

**VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA METALURGIE  
MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**

**KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ PRO AUTOMOBILY**



**MĚŘENÍ DEFORMACE 3D TIŠTĚNÉ  
PROSTOROVÉ STRUKTURY  
AUTOMOBILOVÉHO SVĚTLOMETU  
METODOU DIC**

MEASUREMENT OF STRAIN OF THE 3D PRINTED SPACE FRAME OF  
AUTOMOTIVE HEADLAMP BY DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE: BC. FILIP HUVAR**

AUTHOR

**VEDOUCÍ PRÁCE: ING. JIŘÍ KULHÁNEK PH.D.**

SUPERVISOR

**Ostrava 2018**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra materiálů a technologií pro automobily

## **Zadání diplomové práce**

Student: **Bc. Filip Huvar**

Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911T034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma: **Měření deformace 3D tištěné prostorové struktury automobilového světlu metodou DIC**  
**Measurement of strain of the 3D printed space frame of automotive headlamp by digital image correlation method**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principem metody DIC (digital image correlation).
2. Navrhněte způsob zatěžování nosné struktury automobilového světlu, odpovídající mezním stavům při jeho provozu.
3. Proveďte měření deformací při statickém zatížení metodou DIC a delšími metodami (3D scan, fotometrie).
4. Vyhodnoťte validnost naměřených dat a porovnejte s předpokladem z FEM analýzy.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte optimální postup měření metodou DIC.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1]EISLEY, Joe a Anthony M. WAAS. Analysis of structures: an introduction including numerical methods. Chichester: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-97762-0.
- [2]ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 125 s. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [3]POCHMON, Michal. Optické měřicí 3D metody. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 13 s. ISBN 978-80-244-3072-0.
- [4]PAVLÍČEK, Pavel. Vybrané optické problémy týkající se 3D senzorů. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 37 s. ISBN 978-80-244-3108-6.
- [5]LIČEV, Lačezar. Analýza, modelování, rozpoznávání a vizualizace procesu měření objektů na snímcích. Brno: Computer Press, 2010. ISBN 978-80-251-3296-8.
- [6]PAVELKA, Karel. Fotogrammetrie 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [7]ŠONKA, Milan, Václav HLAVÁČ a Roger BOYLE. Image processing, analysis, and machine vision. Fourth edition. Austrálie: Cengage Learning, 2015. ISBN 978-1-133-59369-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kulháněk, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018

---

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
*děkanka fakulty*

# **Zásady pro vypracování diplomové práce**

## **I.**

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právníké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách).

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2016/2017.

Ostrava 2. 12. 2016



**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



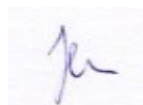
# Prohlášení

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.**

V Ostravě 08. 10. 2017



FILIP HUVAR

# Abstrakt

Tato práce pojednává a seznamuje s bezkontaktní metodou měření deformací 3D tištěné prostorové struktury automobilového světlometu. Konkrétně se jedná o metodu DIC (digital image correlation). V první části se práce zabývá optickými metodami měření deformací, převážně pak principem metody DIC. V druhé části se pojednává o návrhu zatěžování nosné struktury světlometu při mezních stavech v provozu. Třetí část práce se zaměřuje na měření deformací při statickém zatížení. V další části se práce zabývá vyhodnocením a validností naměřených dat s předpokladem z FEM analýzy. V poslední části diplomové práce jsou zhodnoceny výsledky a je navržena optimalizace postupu měření metodou DIC.

**Klíčová slova:** DIC (digital image correlation), měření deformací, FEM analýzy, 3D tištěná prostorová struktura

# Abstract

This work deals with the introduction of the non-contact method of measurement of deformations of the 3D printed space structure of the automobile headlamp. Specifically, this is a digital image correlation (DIC) method. In the first part, the thesis deals with optical methods of deformation measurement, mainly the principle of the DIC method. The second part deals with the design of the load-bearing structure of the headlamp at the limit states in operation. The third part focuses on measuring deformation under static load. In the next part, the thesis deals with evaluation and validity of measured data with the assumption of FEM analysis. In the last part of the diploma thesis, the results are evaluated and optimization of the measurement procedure is proposed.

**Keywords:** DIC (digital image correlation), deformation measurement, FEM analysis, 3D printed spatial structure

## **Bibliografická citace**

HUVAR, F. MĚŘENÍ DEFORMACE 3D TIŠTĚNÉ PROSTOROVÉ STRUKTURY AUTOMOBILOVÉHO SVĚTLOMETU METODOU DIC. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství 2018. 73str. Vedoucí práce Ing. Jiří Kulhánec Ph.D.



# **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi byli nápomocní při tvorbě této práce. Hlavně vedoucímu panu Ing. Jiřímu Kulhánkovi Ph.D., za poskytnutí odborných podkladů a konzultací pro vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Juránkovi Ph.D. a Ing. Miroslavovi Suchánkovi za konzultace a pomoc s praktickou částí diplomové práce.

# Seznam zkratek

CAD – Computer Aided Design – počítačem podporované navrhování

DIC – Digital Image Correlation – digitální korelace obrazu

FEM – Finite Element Method – metoda konečných prvků

LAN – Local Area Network – lokální počítačová síť

USB – Universal Serial BUS – univerzální sériová sběrnice

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Seznámení s principem metody DIC.....	2
2.1	Optické snímače pro měření deformací.....	2
2.2	Video-extenzometr .....	3
2.3	Laserový extenzometr.....	7
2.4	Digital Image Correlation (DIC) .....	8
2.4.1	Podstata metody .....	10
2.4.2	Typy tvarových funkcí .....	11
2.4.3	Korelace obrazu.....	13
2.4.4	Určení posuvů na pixelové úrovni .....	13
2.4.5	Určení posuvů na sub-pixelové úrovni.....	14
3	Návrh zatěžování nosné struktury automobilového světlometu .....	17
3.1	Rámeček automobilu .....	17
3.2	Technologie výroby.....	18
3.3	Konstrukce.....	19
3.4	Výroba .....	20
3.5	Návrh zatížení rámečku .....	21
3.6	Skenovací systém Mercury RT.....	23
3.7	Kontrola tuhosti standu.....	24
4	Měření deformací při statickém zatížení pomocí FEM výpočtů.....	27
4.1	Rozložení deformací a napětí při statickém zatížení rámečku .....	27
4.2	Úprava dílů pro FEM výpočet a 3D tisk.....	30
4.3	FEM výpočet statického zatížení rámečku .....	31
5	Měření deformací při statickém zatížení metodou DIC a 3D scan .....	34

5.1	Váhový senzor pro určení síly při zatížení rámečku světlometu.....	34
5.2	Příprava pro měření deformací metodou DIC .....	36
5.3	Příprava rámečku pro skenování metodou DIC .....	38
5.4	Skenování rámečku světlometu metodou DIC .....	39
5.5	Úprava naměřených dat v softwaru MercuryRT .....	40
5.6	Měření deformací metodou 3D scan .....	41
5.7	Úprava naskenovaných dat.....	43
5.8	Srovnání skenu a CAD modelu .....	44
5.9	Srovnání skenů před a po deformaci .....	45
6	Vyhodnocení naměřených dat.....	47
6.1	Vyhodnocení naměřených dat metodou DIC .....	47
6.2	Vyhodnocení naměřených dat metodou 3D scan .....	51
6.3	Vyhodnocení naměřených dat metodou FEM výpočtu .....	53
7	Zhodnocení dosažených výsledků.....	57
8	Závěr.....	59

# 1 Úvod

Diplomová práce se zabývá a seznamuje s optickými snímači pro měření deformací, konkrétně se zaměřuje na popis principu měření metodou DIC (digital image correlation). Tato metoda měření se dnes v hojné míře využívá v průmyslu. Konkrétní využití lze najít například ve stavebnictví pro kontrolu mostů, v laboratoři a zkušebních ústavech pro sledování průběhu napětí při trhacích zkouškách, nebo jako podpůrná metoda při kontrole pevnosti strojně vyrobených dílů.

Obecně se dnes v automobilovém průmyslu tlačí na snižování hmotnosti téměř na všech dílech. Konvenční způsoby výroby dílů pomocí technologií jako je obrábění, kování nebo odlévání nemusí vždy zaručovat nejmenší hmotnost. Na scénu se tak dostávají nové progresivní metody výroby. Jednou z nich může být 3D tisk kovu. Katedra materiálů a technologií pro automobilový průmysl, na které studuji, se zapojila do projektu v oblasti aditivních technologií v automotive. Tento projekt se zabýval konkrétně optimalizací tvaru a výroby již realizované součásti hlavního světlometu automobilu.

V práci se pojednává o způsobu zatížení a samotném měření deformací na nosné struktuře právě tohoto světlometu. Tento díl byl vyroben pomocí technologie 3D tisku kovu.

Cílem práce je vyhodnotit validnost naměřených dat a porovnat je s předpokladem z FEM analýzy. Tyto výsledky následně zhodnotit a navrhnout optimální postup pro měření metodou DIC.

## **2 Seznámení s principem metody DIC**

Jedná se o nejvšestrannější metodu vyhodnocování deformací. Zkouška je prováděna za pomoci jedné, dvou, nebo více kamer s vysokým rozlišením. Výhodou je možnost využití pro široký rozsah technických aplikací. Důvodem je bezkontaktní a celoplošné měření na rozdíl od tenzometrů. [2]

### **2.1 Optické snímače pro měření deformací**

Nejběžněji se technologie optického měření deformací využívá při tahové zkoušce jako dodatečné měřicí zařízení. Tato zařízení jsou schopna zaznamenat i velice malé deformace. Navíc oproti mechanickým snímačům mají několik výhod. Princip této metody spočívá ve skenování středů koncových značek na zkoušeném vzorku. Výslednou hodnotu deformace pak program vyčte z rozdílu hodnot délky mezi značkami před a po zatížení.

Jak již bylo zmíněno, jednou z výhod je možnost zaznamenat mnohem přesnější výsledky měření. Další výhodou je možnost zaznamenávat krom podélných deformací také deformace příčné. Hodnoty naměřené při testu nám umožní lépe vyhodnotit charakteristiku napětí v průběhu zkoušky.

Nespornou výhodou je zaznamenávání dat v celé průběhu zkoušky. Je tedy možné sledovat vzorek až do úplného porušení. Naproti u některých tenzometrů, při tahové zkoušce, je třeba brát zřetel na tvoření krčku na zkoušeném vzorku. Po dosažení této fáze je třeba vzorek z přístroje odejmout, aby nedošlo k poškození měřicího přístroje.

Nevýhodou optického přístroje je pak asi pouze jeho pořizovací cena. Ta se pohybuje v řádech miliónů korun. [2]

## 2.2 Video-extenzometr

Jedná se o systém se speciální digitální kamerou s vysokým rozlišením (*Obr. 1*), který zaznamenává změnu polohy bodů na testovaném vzorku. Tento systém vyhodnocuje změny polohy bodů na principu sledování reliéfu povrchu vzorku. Obraz se zaznamenává buďto ve vysokém rozlišení, nebo se využívá rychlý záznam obrázkových bodů za sebou. [2]



Obr. 1 – Digitální kamera s vysokým rozlišením [1]

Průběh zkoušky se zaznamenává na videokameru. V podstatě se jedná o digitální fotoaparát (*Obr. 2*), který zaznamenává zkoušku v reálném čase. Obraz je přenášén přes optický kabel do počítače. Optický kabel je zvolen z důvodu rychlosti přenosu dat. Tento parametr je při této aplikaci důležitý. [2]

Výhodou této technologie je její flexibilita a dosažení vysoké přesnosti v široké škále aplikací. Dále se toto řešení hodí pro měření tenkých materiálů, nebo tam kde vzorek při namáhání uvolňuje energii. Obecně se dá říci že s vylepšením v oblasti video technologie a softwaru pro analýzu obrazu se zajistilo přesné měření pro řadu specifických aplikací. Zejména se jedná o případy, kdy kontaktní měřidla mohou mít nepříznivý vliv na výsledky testů. [3]



Obr. 2 – Video-extenzometr [3]



Další možností pro měření deformací je za pomoci vysokorychlostní kamery (*Obr. 3*). Označení pro tento typ kamer je HSC (high speed camera). V praxi se tyto typy kamer využívají pro zkoušky mechanických vlastností. Například můžeme uvést odolnost proti nárazu a průrazu, průběh lomu, nebo i pro zkoušku tahem s vysokou rychlostí zatěžování. [2]

Jedná se o zařízení s vysokou frekvencí snímání. Ve většině případů bývá bez displeje a s minimem ovládacích prvků. Veškeré ovládání kamery probíhá skrz počítač, ke kterému je připojena. Můžeme se setkat jak s barevnou, tak s černobílou verzí. U černobílé verze může být výhodou menší obsah zpracovávaných dat a přenášených dat. Při frekvenci 20 000 snímků za vteřinu se nám každou vteřinu může uložit až 1 Gb dat. [2]

Výhodou tohoto systému je že ke každému obrázku je možno přiřadit čas pořízení. Toto nám dá lepší povědomí o změně tvaru těles v určitém čase. Další výhodou je možnost opětovného shlédnutí nafilmovaného testu. [2]

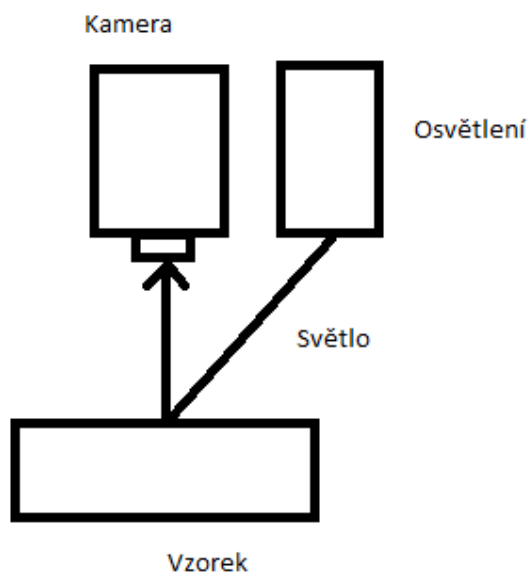


Obr. 3 – Vysoko rychlostní kamera [13]

Pro kvalitní snímání je velice důležité vzorek dostatečně nasvítit. Je nutné zajistit velmi výkonné osvětlení kvůli vysoké frekvenci snímání. Nejčastěji se tak používají halogenová, výbojková, nebo výjimečně výbojkové blesky. Ty jsou synchronizovány s časem tvorby jednotlivých snímků. Světla se nám starají o dosažení největšího možného kontrastu částí objektů, které nás zajímají.

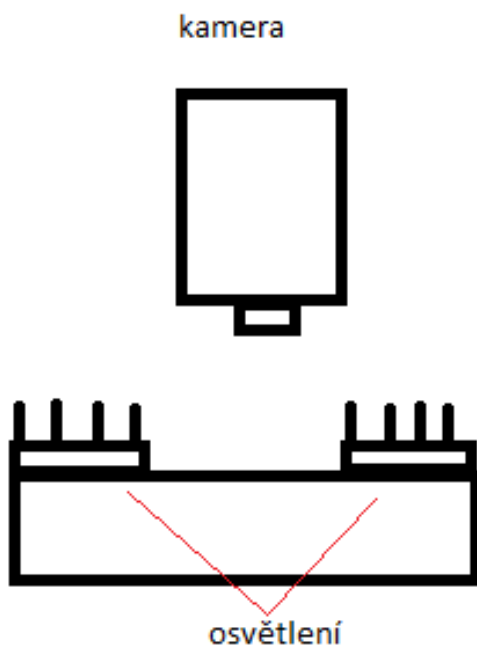
Využívá se pěti typů osvětlení:

- Prvním z nich je osvětlení čelní (*Obr. 4*). Odražené světlo tedy dopadá přímo do objektivu.



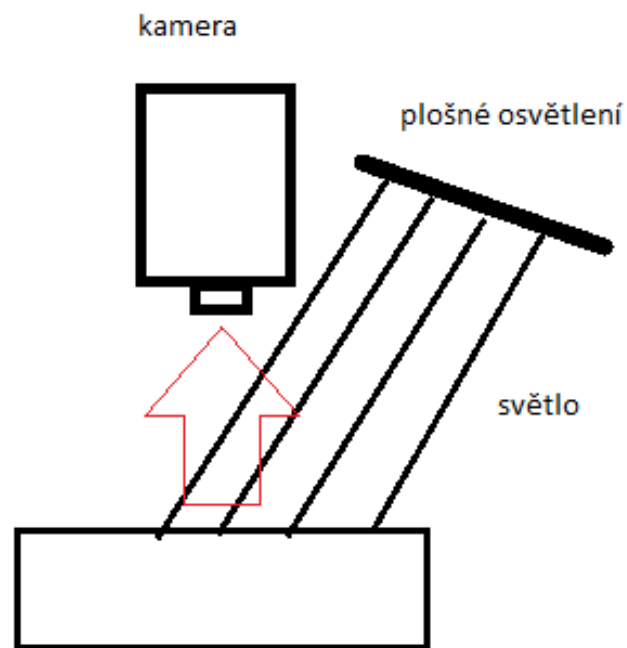
Obr. 4 – Čelní osvětlení

- Zadní osvětlení (*Obr. 5*) je typické při měření rozměrů. Osvětlení vytvoří kontrastní obrys.



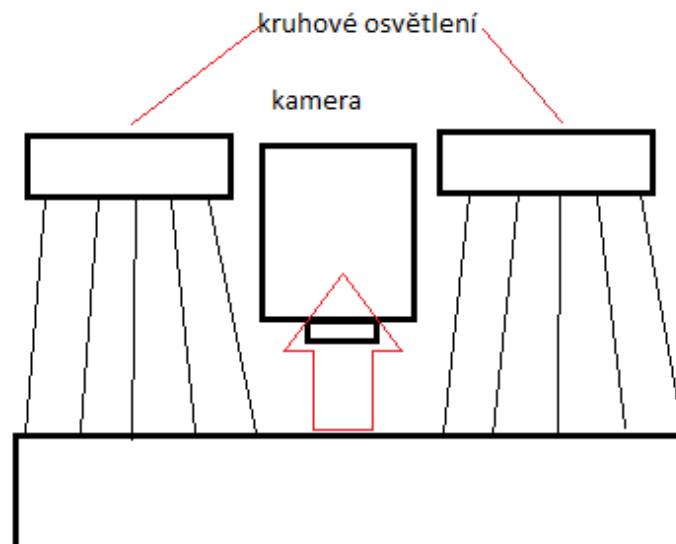
Obr. 5 – Zadní osvětlení

- Plošné osvětlovací pole je směřované světlo sloužící v nenáročných aplikacích nebo jako pomocná světla pro složitější osvětlovací soustavy (*Obr. 6*).



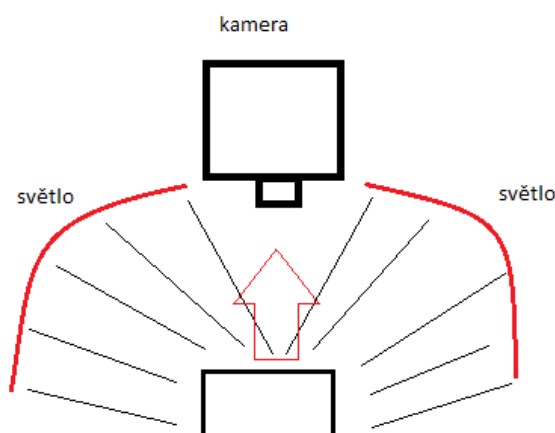
Obr. 6 – Plošné osvětlení

- Kruhový osvětlovač (*Obr. 7*) poskytuje více rozptýlení světlo směřující od objektivu kamery.



Obr. 7 – Kruhové osvětlení

- Kopulové osvětlovače (*Obr. 8*) se používají v aplikacích, kde je nutné osvětlit objekt rozptýleným světlem



Obr. 8 – Kopulové osvětlení

## 2.3 Laserový extenzometr

Jako další druh bezkontaktních přístrojů pro měření deformací je laserový extenzometr (*Obr. 9*). Využívá laserového paprsku, který je vzniká excitací fotonů v atomu. Nejčastěji se využívá při provádění zkoušky tahem a u tlakové zkoušky. [2]

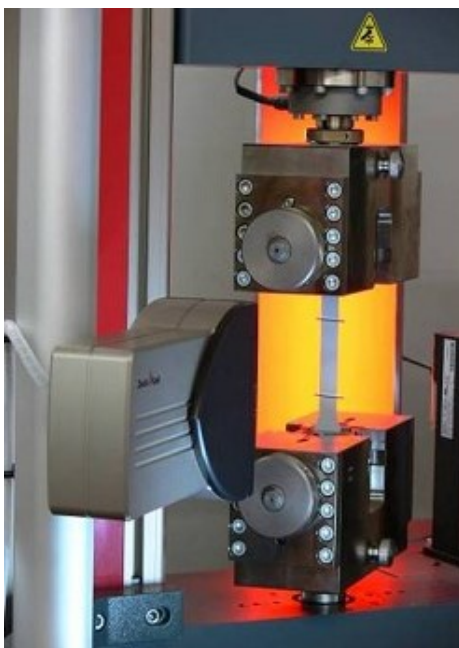
Nespornou výhodou u této metody je rychlost přípravy vzorku. Ve většině případů není třeba označovat počáteční měřenou délku. Což je jak časová, tak ekonomická úspora. Povrch vzorku také není třeba speciálně upravovat. Jako souřadnicový systém slouží nerovnosti na vzorku. Ty si systém naskenuje a používá je pro vyhodnocení samotné deformace. [2]



Obr. 9 – Laserový extenzometr [5]

Průběh skenování (*Obr. 10*) je stejně jako u video-extenzometru možné sledovat až do konce zkoušky. Tedy až do přetrhnutí vzorku. Také je možnost skener využít pro měření za vysokých teplot. Nutné je ovšem dbát na zbarvení paprsku. Pro aplikaci na žhnoucí těleso je lepší využít zeleného paprsku. Ten nebude natolik ovlivněn. [2]

Pomocí videokamer se tvoří obrázky. K určení posunutí pak dochází za pomoci porovnání dvou za sebou jdoucích snímků. Pro přesnější měření je třeba zvýšit počet snímků tvořených za čas měření. Čím vyšší rychlost snímání tím větší přenos a objem dat. Na to navazuje také zvýšená náročnost na hardware. [2]



Obr. 10 – Tahová zkouška za zvýšené teploty měřená laserovým extenzometrem [6]

## 2.4 Digital Image Correlation (DIC)

Jedná se o metodu, která se ukázala jako užitečný nástroj pro vyhodnocování deformací. Výsledný záznam je pořizován za pomoci jedné, dvou, nebo více kamer.

V případě, že využíváme pouze jednu kameru, pozorujeme pouze rovinu rovnoběžnou k obrazové rovině kamery. Lze tak určit posuv a rotaci. [2]

Při využití dvou a více kamer (*Obr. 11*) můžeme dosáhnout měření v prostoru. Kamery jsou nastaveny pod určitým úhlem a v určité vzdálenosti od sebe. Každá z těchto kamer pak zaznamenává body na vzorku samostatně. Poté se pomocí algoritmu převedou do 3D prostoru. [2]



Obr. 11 – Využití dvou kamer pro měření deformace metodou DIC [7]

Záznam kamerou se provádí ve stupních šedi. Sleduje se hodnota šedi a souřadnice místa se vždy pro dané místo. Takto se pak zhodnotí každý snímek z jednotlivých kamer. 3D obraz se sestavuje z dvou snímků pořízených ve stejném čase. Tento 3D obraz se pak porovnává následně s následujícími 3D obrazy. Pomocí matematické operace korelace vyhodnotíme změnu polohy. Hledání posuvu v bodě je převedeno na hledání maxima korelační funkce. Korelační funkce se počítá na základě obrazu před deformací a po deformaci tvořeného pixely ve stupních šedi. Skvrnitý vzor se na vzorek může buďto nastříkat sprejem, projektovat na povrch, nebo se využije přirozeného vzoru materiálu vzorku. [9]

Na obsluhu je pak, aby správně nastavila vnitřní parametry. Jedná se především o ohniskovou vzdálenost čočky kamery, radiální deformaci čoček a tangenciální narušení čoček. To vše lze provést ručním posuvem kamer do požadovaného místa. Software se následně sám zaostří na sledovanou součást. Kalibrační body nutné pro měření si software také zaostří automaticky. [2]

Následně je třeba nastavit vnější parametry. Parametry jsou překlad vektoru a matice rotace. Program se o nastavení postará automaticky. Učiní tak poté co jsou znovu ověřeny hodnoty vnitřních parametrů. Parametry je přístroj schopen nastavit pouze z jediného snímku. [2]

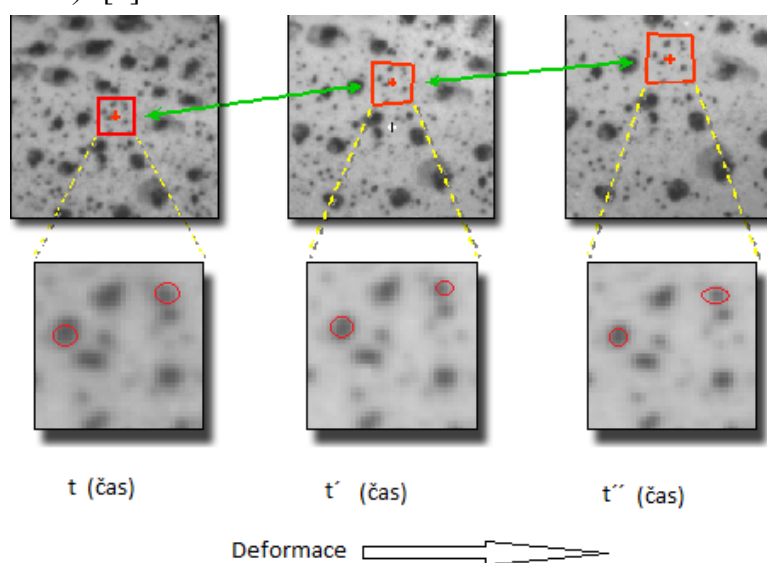
### Digitální korelace obrazu vychází z určitých skutečností [9]:

- Oblast, která je na povrchu tělesa s kontrastním vzorem je pokryta virtuálně pixely. Velikost pixelů souvisí s rozměry analyzované oblasti a také s rozlišovací schopností kamery.
- Diskrétní funkce popisuje optické vlastnosti jednotlivých pixelů. Reprezentuje tak úroveň šedi každého pixelu.
- Korelační analýzy se realizují na vymezených množinách pixelů označovaných jako fasety. Počty pixelů ve všech fasetách povrchu jsou stejné. Uvnitř každé fasety se předpokládá homogenní pole posuvů.
- Stav fasety před deformací a přetvořením je popsán diskretní funkcí  $f(x, y)$ . V procesu přetvoření fasety je zaznamenáván diskretní funkcí  $g(x', y')$ .

#### 2.4.1 Podstata metody

Pro zjednodušení popisu měřicí metody se přesuneme do 2D. Cílem je díky digitální korelaci určit deformační posuvy na povrchu tělesa. Deformační stavy můžeme pozorovat v průběhu nebo na konci. Tyto stavy mohou být vyvolány silově, deformačně, nebo teplotní aktivací. [9]

Představme si tři snímky se skvrnitým vzorem. Snímky budou pořízeny před, v průběhu a po deformaci. Snímky jsou rozděleny na fasety. V nich pak hledáme posuvy ve dvou na sebe kolmých osách (Obr. 12). [9]



Obr. 12 – Princip fungování metody DIC, převzato z [8]

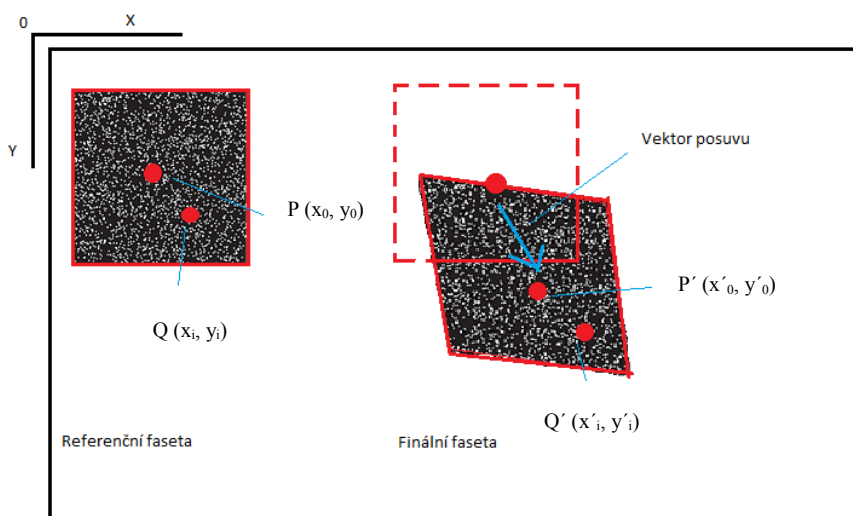


Tvarové funkce nám poté popisují body ve fasetě (Obr. 13). Určeme si střed fasety  $P(x_0, y_0)$  a poté obecný bod fasety  $Q(x_i, y_i)$ . Při zatížení vzorku se změní poloha bodů. Následně nám vznikají souřadnice

$$P'(x'_0, y'_0) \text{ a } Q'(x'_i, y'_i).$$

Změnu polohy bodu  $Q$  popisují takzvané tvarové funkce  $\xi$  a  $\eta$ . Ty lze využít pro vyjádření souřadnice bodu  $Q'$  takto:

$$x'_i = x_i + \xi(x_i, y_i), \quad y'_i = y_i + \eta(x_i, y_i), \quad (i, j = -M:M) \quad [9]$$



Obr. 13 – Referenční a finální faseta, převzato z [9]

## 2.4.2 Typy tvarových funkcí

Funkce nultého řádu:

Tento typ tvarové funkce předpokládá stejný posuv všech bodů uvnitř fasety (posuvy bodů, které se pohybují uvnitř, nejsou podstatné). Faseta se posouvá pouze ve dvou směrech a to posuv  $u$  (osa  $x$ ) a posuv  $v$  (osa  $y$ ). Pak tedy platí:

$$\xi_0(x_i, y_i) = u \quad \eta_0(x_i, y_i) = v$$

Pomocí těchto funkcí ovšem nelze popsat tvarové změny fasety jako pootočení, úhlová, nebo délková přetvoření.

Funkce prvního řádu:

Vychází z (Obr. 14) a je popsána těmito vztahy.

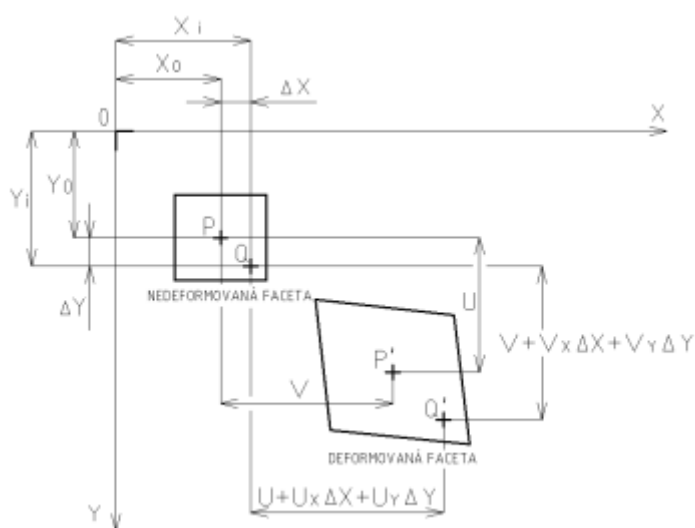
$$\xi_1(x_i, y_j) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad \eta_1(x_i, y_j) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y$$

$$\Delta x = x_i - x_0$$

$$\Delta y = y_j - y_0$$

$u_x, u_y, v_x, v_y$  – gradienty posuvů

$u, v$  – posuvy středu referenční fasety v osách  $x, y$  [9]



Obr. 14 – Schéma pro pochopení funkce prvního řádu, převzato z [9]

Funkce druhého řádu:

Využití nalézají pro složité deformační změny. Lze je vyjádřit následovně:

$$\xi_2(x_i, y_j) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + u_{xx} \Delta x^2 / 2 + u_{yy} \Delta y^2 / 2 + u_{xy} \Delta x \Delta y$$

$$\eta_2(x_i, y_j) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + v_{xx} \Delta x^2 / 2 + v_{yy} \Delta y^2 / 2 + v_{xy} \Delta x \Delta y$$

$u_{xx}, u_{yy}, u_{xy}, v_{xx}, v_{yy}, v_{xy}$  – gradienty posuvů druhého řádu [9]

### 2.4.3 Korelace obrazu

Dává nám obecně míru podobnosti dvou entit. V našem případě se jedná o podobnost dvojice obrazů. Metoda DIC se řídí mnoha korelačními kritérii. Ty vznikly v procesu rozvoje této metody. Dají se členit do dvou skupin. Na takzvaná Cross Correlation (CC) a Sum of Squared Differences (SSD). Nejčastěji se používají křížová korelační kritéria. [9]

Z hlediska přesnosti měření se korelace obrazu realizuje ve dvou úrovních: [9]

- Pixelová úroveň

Korelační fasety nám pomohou určit polohu středu fasety. Hledá se pro stav před a po zatížení tělesa. Koreluje stupeň šedi dané fasety. Hledáme tedy bod, kam se posune referenční faseta. Posuv všech bodů s přesností na pixely zjistíme tak, že tento postup zopakujeme pro všechny fasety.

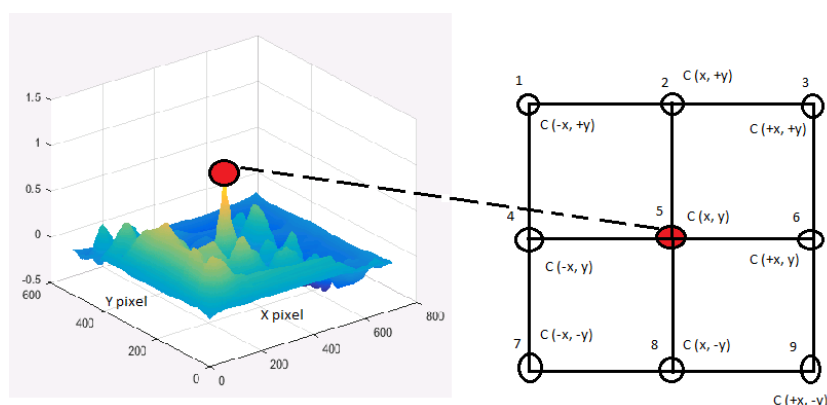
- Sub-pixelová úroveň

Jelikož mohou být v praktických aplikacích výsledky s přesností na pixel nedostačující, musí proběhnout korelace na vyšší rozlišovací úrovni. Algoritmy, které realizují vyhodnocení, označujeme sub-pixelové registrační algoritmy.

### 2.4.4 Určení posuvů na pixelové úrovni

Obraz, na kterém se nachází skvrnitý vzor, je rozdělen na fasety, které mají rozměr  $(2M + 1) \times (2M + 1)$  pixelů. U fasety, která je takto definována, hledáme její posuv způsobený aktivací vzorku. V případě, že se podaří tuto polohu učít, je zároveň určen i posun těžiště fasety. [9]

Mapováním můžeme získat průběh korelační funkce. Ta je určena v závislosti na posuvech v ose  $x$  a v ose  $y$ . Nejmenší jednotkou posuvu je pixel. Korelace je pak vyjádřením funkce posuvů (*Obr. 15*). Pokud nalezneme maximum korelační funkce, dokážeme také určit hodnoty posuvu v osách  $x$  a  $y$ . [9]



Obr. 15 – Korelační funkce, převzato z [10]

V případě, že má pixel velký rozměr a měření s přesností na pixely je nevyhovující, Zvýšíme přesnost následujícími způsoby: [9]

- Zajistit pořizování obrázku pomocí kamery s vyšší rozlišovací schopností. To znamená zvýšit rozlišovací schopnost CCD čipů použitých v kameře.
- Pokud máme k dispozici výměnnou optiku u kamer, pak měřenou oblast přiblížit a zvýšit tím rozlišení na požadované oblasti.
- Najít a použít vhodný sub-pixelový algoritmus pro výpočet.

## 2.4.5 Určení posuvů na sub-pixelové úrovni

Pokud potřebujeme přesnější měření, dostáváme se na sub-pixelovou úroveň. Pro určení posuvů v této úrovni je zapotřebí takzvaných sub-pixelových registračních algoritmů. Tyto algoritmy zpřesňují hodnotu posuvů referenční fasety při posuvu tělesa nebo jeho aktivaci, oproti hodnotám posuvu fasetového těžiště. [9]

Uvedeme si tři z nich:

- Určení korelačního koeficientu fitační metodou:

Jedná se o jeden ze způsobů, jak zpřesnit výpočet posuvů. Můžeme fitovat aproximační plochu na námi známou korelační funkci  $C(x_i, y_j)$ . Aproximační korelační funkce pak realizuje odhad deformace menší než jeden pixel. [9]

Aproximační funkce:

$$C(x_i, y_j) = a_0 + a_1x_i + a_2y_j + a_3x_i^2 + a_4x_iy_j + a_5y_j^2$$

Extrém nalezneme dle podmínky:

$$\frac{\partial C(x,y)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial C(x,y)}{\partial y} = 0$$

Extrém tedy nalezneme v době, který má tyto souřadnice:

$$x = \frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}$$

$$y = \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}$$

- Interpolace intenzity šedi

Na základě diskretního rozdělení stupňů šedi realizujeme odhad deformace menší než jeden pixel. Interpolace intenzity následně vychází z vytvoření jemnější sítě na námi vybrané fasetě referenčního obrazu.

Jestliže máme cílový obraz s velikostí  $M \times M$  a referenční obraz o rozměrech  $N \times N$  a chtěli bychom registrační přesnost 0,1 pixelu, pak musí být referenční obraz interpolován vytvořením další nové verze s rozměrem  $(10 \times N) \times (10 \times N)$ . Tato metoda se následně řeší iteračním algoritmem. Ten sníží nároky na čas potřebný k výpočtu. [9]

- Newton-Rhapsonova iterační metoda

Údaje, které potřebujeme na začátku, jsou informace o posuvech  $u$  a  $v$  těžiště fasety v aktivovaném stavu. Tyto údaje byly získány na mezifasetové úrovni. Hodnoty posuvů se upřesňují minimalizací korelační funkce součtu čtverců. V ní pak vystupují funkce, které popisují diskretní rozdělení šedi v nedeformované fasetě a nedeformované fasetě.

Předpoklad je, že mezi obecným bodem  $(x, y)$  fasety na povrchu neaktivovaného tělesa a bodem  $(x', y')$ , který se nachází na povrchu aktivovaného tělesa jsou v platnosti tyto vztahy:

$$x' = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y$$

$$y' = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y$$

$u, v$  – složky posuvů těžiště  $P$  fasety ve směrech  $x$  a  $y$

$\Delta x, \Delta y$  – vzdálenosti od těžiště

Gradientní členy ve vztahu nacházejícím se výše znamenají, že může nastat délkové i úhlové přetvoření fasety. K hodnocení stejnosti fasety před a po deformaci se využívá suma čtverců rozdílu  $C_{SSD}$ .

$$C_{SSD} = C(P) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - g(x', y')]^2$$

Korelační funkce je v intervalu  $[0, +\infty]$  funkcí vektoru:

$$P = (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y)^T$$

$u, v$  – složky posuvů těžiště  $P$  fasety ve směrech  $x, y$

$u_x, u_y, v_x, v_y$  – gradienty prvního stupně

Minimální hodnotě korelační funkce  $C(P)$  odpovídá maximální shoda mezi fasetou v neaktivovaném a aktivovaném stavu. Hledání extrému funkce  $C(P)$  se pak může realizovat za pomoci Newton-Raphosonovy iterační metody. [9]

### 3 Návrh zatěžování nosné struktury automobilového světlometu

Návrh zatěžování se uskutečnil na prototypovém dílu rámečku elektromobilu SCX. Díl byl vyroben pomocí progresivní technologie 3D tisku kovu. Návrhy zatěžování byly provedeny v softwaru Solidworks.

#### 3.1 Rámeček automobilu

Na (Obr. 16) je znázorněno současné řešení rámečku, který slouží k naklápění lamp v hlavním světlometu. Nový rámeček bude splňovat kinematické normy a pevnost soustavy. Dále bude navržen vzhledem k předpokládané technologii výroby, tj. aditivní technologie 3D tisku z kovového prášku.



Obr. 16 – Stávající řešení rámečku

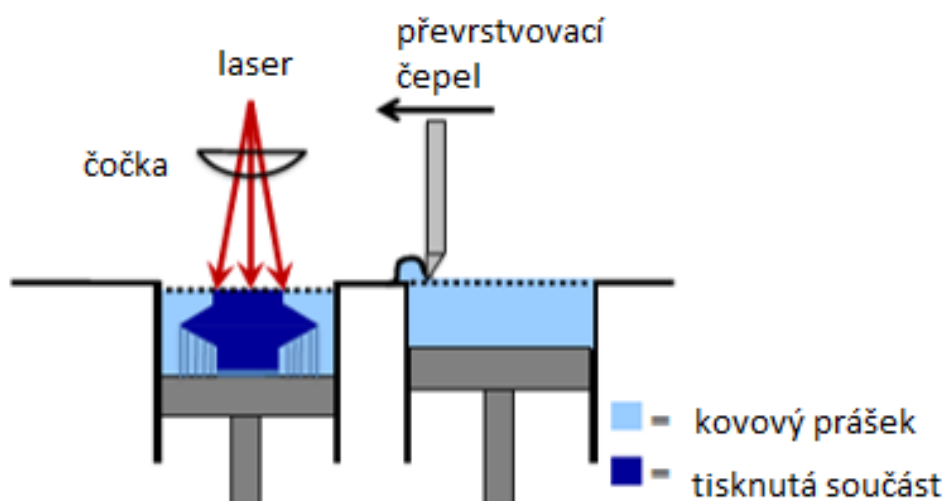


## 3.2 Technologie výroby

3D tisk technologií SLS umožňuje využití kovového materiálu. Jako náplň tiskárny se využívá ocelový prášek. V našem případě se jedná o nástrojovou ocel. Kovová hmota se spéká za pomoci výkonného laserového paprsku. Jde o poměrně novou technologii, která nahrazuje obrábění. [11]

Materiál z kovu má podobu prášku. Je spékán po tenkých vrstvách. Ke kovovému prášku se navíc přidává polymerní pojivo, aby vzorek neměnil tvar. Tavenina jedné vrstvy rychle utuhne a na ní se tvoří další vrstva. Po výtisku součásti se nechá ještě vypékat, aby došlo k spálení pojiva. Poté je možné součást dále upravovat. [11]

Technologie výroby z metalického prášku je znázorněna na pracovním schématu tisku (Obr. 17).



Obr. 17 – Princip 3D tisku metalických prášků, převzato z [11]

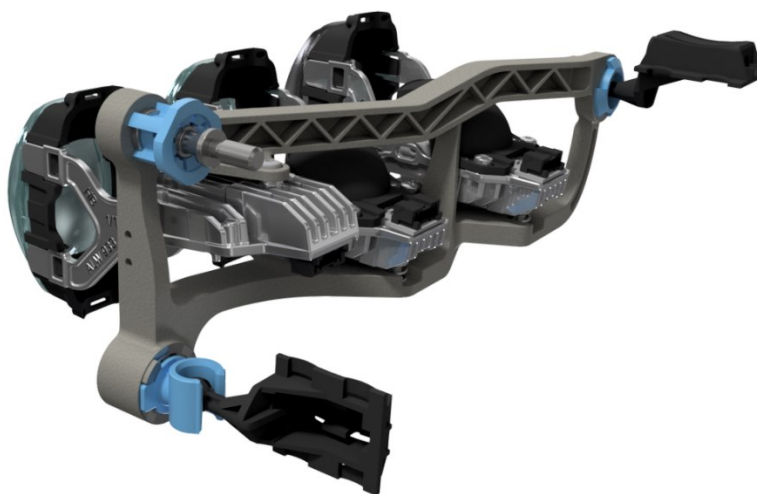
### 3.3 Konstrukce

Kombinací dílčích řešení byl navržen rámeček (*Obr. 18*), který byl v průběhu návrhu optimalizován průběžnými pevnostními výpočty. Rámeček je navržen jako skořepinový díl se stěnou 1 mm. Tloušťka stěny byla zvolena v závislosti na použitém materiálu, ze kterého bude vytištěn. Jedná se o konstrukční vysoce legovanou ocel s vysokou pevností. Z tohoto důvodu bylo možné stěny rámečku navrhnout tenké a tím ušetřit hmotnost a materiál potřebný k tisku.



Obr. 18 – Návrh rámečku světlometu

Pro návrh rámečku světlometu byla stanovena funkční a následně i orgánová struktura návrhu (*Obr. 19*). Funkční struktura představuje souhrn funkcí, které musí výrobek vykonávat. Orgánová struktura definuje výčet jednotlivých komponent nutných pro naplnění předpokladu funkční struktury.

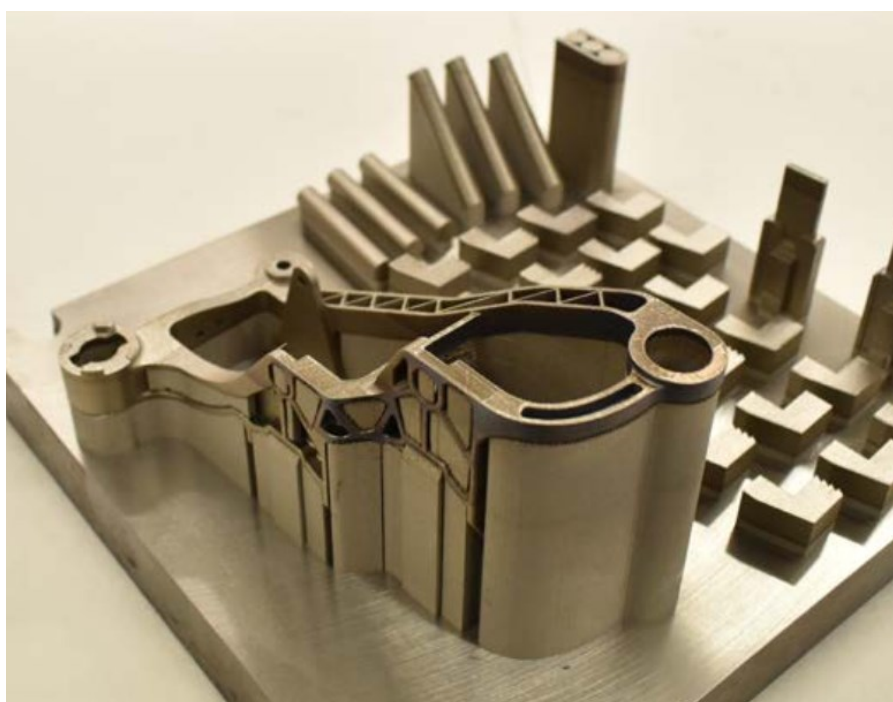


Obr. 19 – Návrh rámečku světlometu s orgánovou strukturou

Výsledný návrh je výsledkem optimalizace průběžných návrhů s nejlepším poměrem hmotnosti a mechanické pevnosti rámečku. Navržený rámeček je vyroben z konstrukční vysoce legované oceli.

### 3.4 Výroba

Rámeček byl vyroben technologií 3D tisku z metalického prášku EOS MaragingSteel MS1/400W. Na obrázku (*Obr. 20*) je vidět struktura řešených podpor. Podpory u 3D tisku slouží jako základny pro tisk plochy umístěných v prostoru tak, aby byla zachována přesnost výroby.

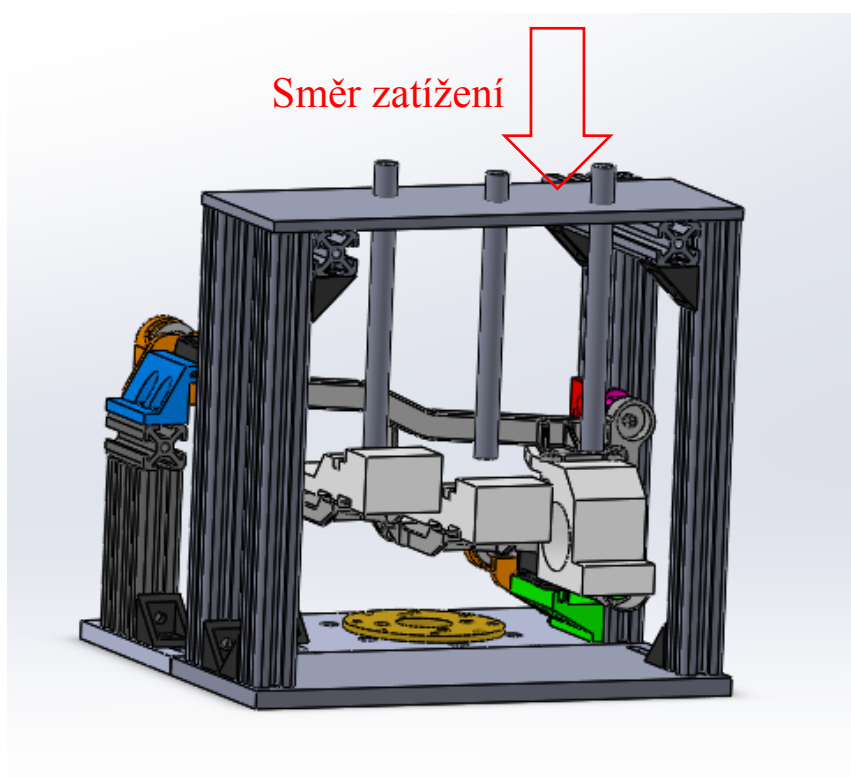


Obr. 20 – Řešení podpor pro 3D tisk

### 3.5 Návrh zatížení rámečku

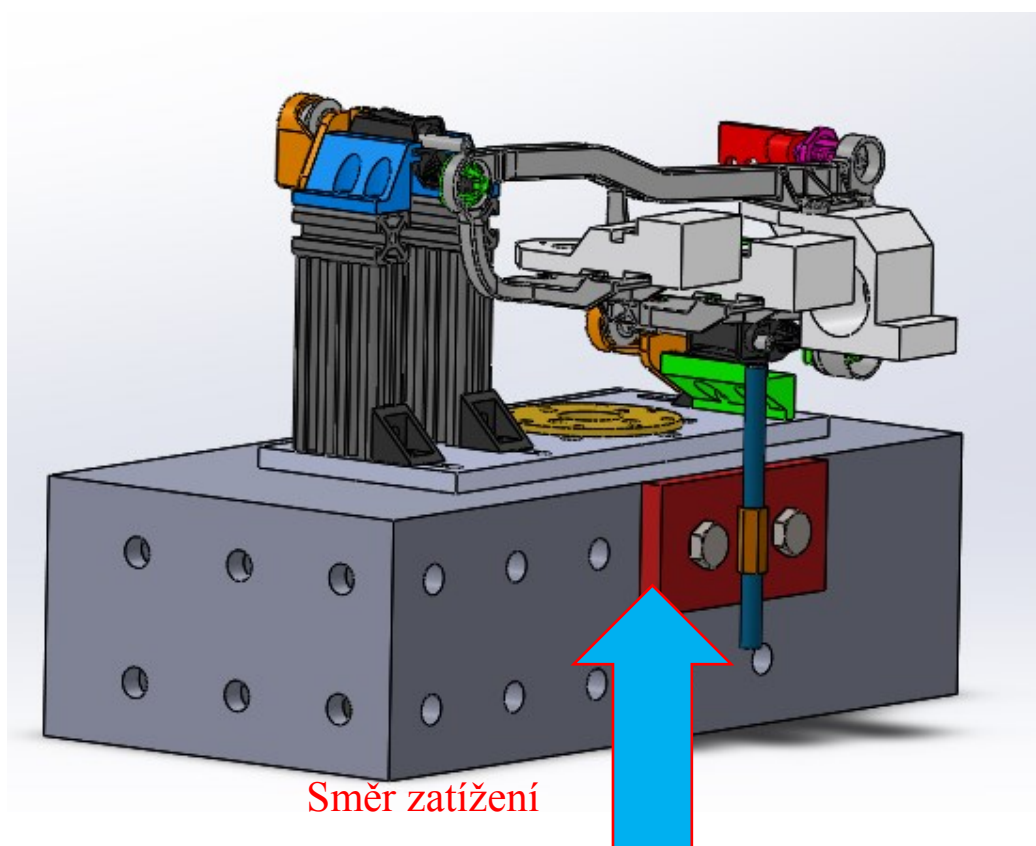
Pro zatížení rámečku, které by simulovalo zatížení v reálném provozu, musel být vymyšlen a zkonstruován přípravek. Tento přípravek měl být jednoduchý a snadno vyrobitelný. Vznikly proto dvě verze, ze kterých se vybralo jedno ideální řešení.

První verze zatěžovacího systému byla navrhována z hliníkových profilů dostupných na katedře. Návrh byl skreslen v CAD softwaru SolidWorks 2016. Lehká konstrukce z hliníkových profilů měla zaručit pevnost, přesnost a jednoduchost výroby. Celý zatěžovací systém navazoval na již vyrobený stand rámečku. Došlo proto k úpravě některých částí a dodání nových rozšiřujících. Dále bylo využito třech závitových tyčí pro zatížení rámečku v těžištích jednotlivých světlometů. Závitové tyče byly využity z důvodu jednoduchosti odečtení posuvu v závislosti na stoupání závitu. Jedna otáčka tyče se pak rovná stoupání závitu. Zatížení mělo probíhat ve směru vyobrazeném na obrázku (*Obr. 21*).



Obr. 21 – Řešení zatížení pomocí tří závitových tyčí

Druhá verze (Obr. 22) vychází z nedostatků té první. První verze je konstrukčně poměrně jednoduchá, ale skládá se ze zbytečného množství jednotlivých dílů. Další nevýhodou tohoto řešení je nemožnost naskenovat důležité části rámečku díky prostorové složitosti přípravku. Z těchto podnětů vzniklo druhé řešení přípravku. Tato verze využívá podpory svařovacího stolu a opět standu rámečku. Konstrukce je jednoduchá s využitím jedné závitové tyče. Řešení jedné závitové tyče bylo využito z důvodu jednoduchosti, prostorové nenáročnosti a s tím související možnosti naskenování rámečku z více úhlů a centralizace síly do jednoho místa (těžiště prostředního světloometu).



Obr. 22 – Řešení zatížení pomocí jedné závitové tyče

Velikost síly působící na rámeček byla zaznamenána za pomoci siloměru. Ten byl umístěn mezi závitovou tyč a světlomet.

### 3.6 Skenovací systém Mercury RT

Jedná se o přístroj, který umožňuje deformační měření vzorků. Systém nabízí uživateli možnost analýzy měření jak online, tak offline. Záznam probíhá za pomoci vysokorychlostních kamer. Výpočet se provádí v reálném čase. Hodnoty se přenáší do připojeného testovacího zařízení, buďto prostřednictvím analogových nebo digitálních výstupů.

Přístroj lze využít pro mnoho aplikací. Nevyužívanější je pro stanovení různých vlastností materiálu jako pevnost v tahu, uni/biaxiální vlastnosti nebo kontrakce. Dále ho lze využít pro měření za velkých deformačních rychlostí, měření vibrací, šíření trhlin, dynamického testování a kontroly kvality.

Mercury RT měří obecné deformace (přetvoření a posuvy) a jakoukoli změnu vzdálenosti mezi dvěma markery v libovolné ose s vysokou sub pixelovou přesností. Založen je na digitální korelaci obrazu (DIC).

#### Příslušenství

- Počítač (softwarové vybavení)
- Obrazovka, klávesnice, myš
- Dvě sady vysokorychlostních kamer
- Dvě LED světla
- Stativ s platformou
- Kalibrační desky

#### Specifikace kamer

Jsou to dvě průmyslové CMOS kamery (*Obr. 23*) s nízkým šumem. Rozlišení kamer je 9Mpx. O odvádění tepla se starají hliníková žebra. Mechanické rozhraní kamer zajišťuje data s vysokým rozlišením, které se následně využijí pro výpočet metodou DIC.

- Rozhraní: GigE IEEE 802.3at 1000baseT (PoE)
- Typ snímače: CMOS
- Rozlišení: 3376x2704px, velikost 3,7 $\mu$ m pixelů
- Snímková frekvence při plném rozlišení: 9 snímků za sekundu
- Optický držák: C-mount

### Specifikace čoček pro 9Mpx 3D Mercury RT systém

Ohnisková vzdálenost 16 mm		Ohnisková vzdálenost 35 mm	
Zorné pole [mm]	Pracovní vzdálenost [mm]	Zorné pole [mm]	Pracovní vzdálenost [mm]
150	190	150	190
300	390	300	390
500	640	500	640
100	1280	100	1280

Obr. 23 – Specifikace čoček kamer

### 3.7 Kontrola tuhosti standu

Před samotným měřením deformací bylo zapotřebí určit, zdali je stand, na kterém je rámeček uchycen, dostatečně tuhý. Pokud by nebyl, mohl by mít negativní vliv na výsledné měření. Celý systém byl pak pevně uchycen ke svařovacímu stolu pomocí svorek.

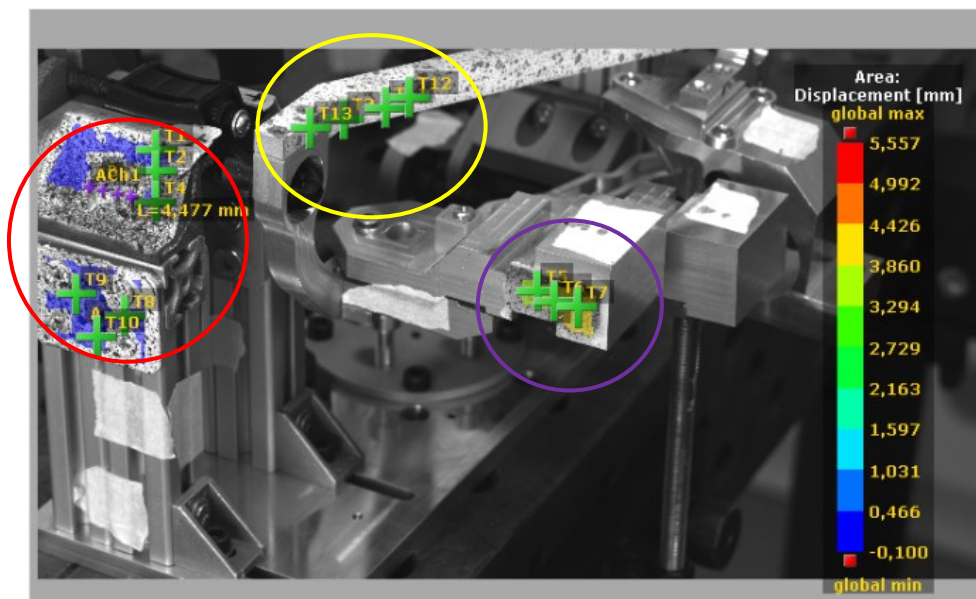
Z tohoto důvodu byla vytvořena zkušební úloha. Patern ze spreje byl nanesen jak na stand tak na část rámečku a hliníkový blok představující světlomet. Díky paternu dokáže software rozpoznat posuvy.

V červeném kruhu na (Obr. 24) můžeme vidět body umístěny na standu pro rámeček. Jedná se o hliníkový profil a pomocnou součást vytisknutou 3D tiskem. Zde byly při zatížení naměřeny hodnoty posuvů pohybující se v setinách milimetru.

Ve žlutém kruhu na (Obr. 24) lze vidět body umístěny na horní část rámečku světlometu. Zde byly při měření zaznamenány deformace do 2 mm.

Ve fialovém kruhu na (Obr. 24) jsou body umístěny na hliníkovém obrobku nahrazujícím reálný světlomet. Na této části se objevily v průběhu měření největší posuvy. Ty se pohybovaly do 5,2 mm. Jednalo se tedy o největší naměřené posuvy.



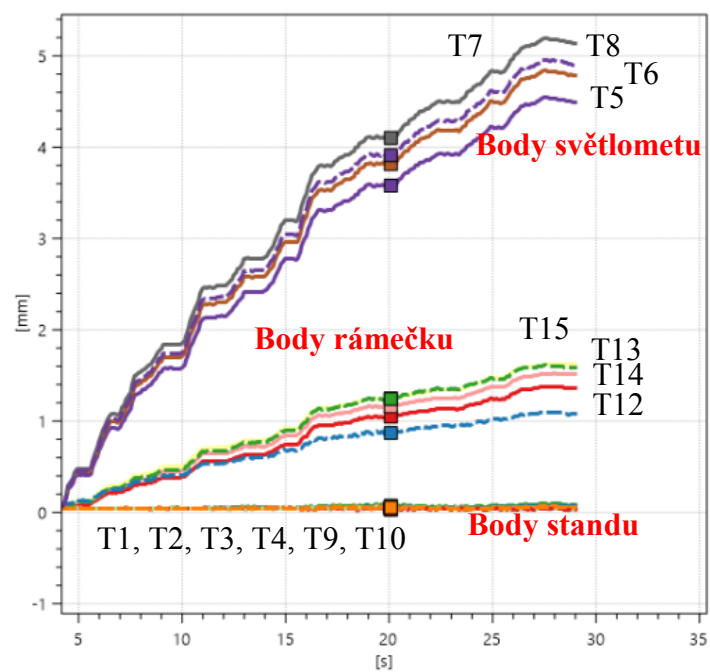


Obr. 24 – Měření posuvů

Skupiny bodů byly záměrně zvoleny tak, aby svou polohou reprezentovaly rozdílné části sestavy, ve kterých dojde k různě velkým posuvům. Posuvy bodů v červeném kruhu mají symbolizovat posuvy na standu a potažmo celé podpůrné sestavy. Zde se očekávají nejmenší hodnoty. Body ve žlutém kruhu jsou zvoleny tak, aby ukazovaly posuvy na rámečku světloometu. Body ve fialovém rámečku pak zobrazují místo velice blízké místu zatěžování. Tak abychom měli lepší představu o chování rámečku v tomto místě. Obecně byl výběr bodů také ovlivněn hloubkou ostrosti skenovacího zařízení. Až na základě tohoto omezení byly vybrány skupiny bodů.

Posuvy byly také vyneseny pro každý jednotlivý bod zvlášť do grafu (Obr. 25). Z grafu je opět patrné že posuvy bodů standu byli vůči posuvům bodů rámečku a světloometu zanedbatelné.

Experiment potvrdil, že při zatěžování rámečku zůstává stand dostatečně tuhý a pevný. Posuvy na standu byly o dva řády nižší než na rámečku.



Obr. 25 – Graf s naměřenými posuvy

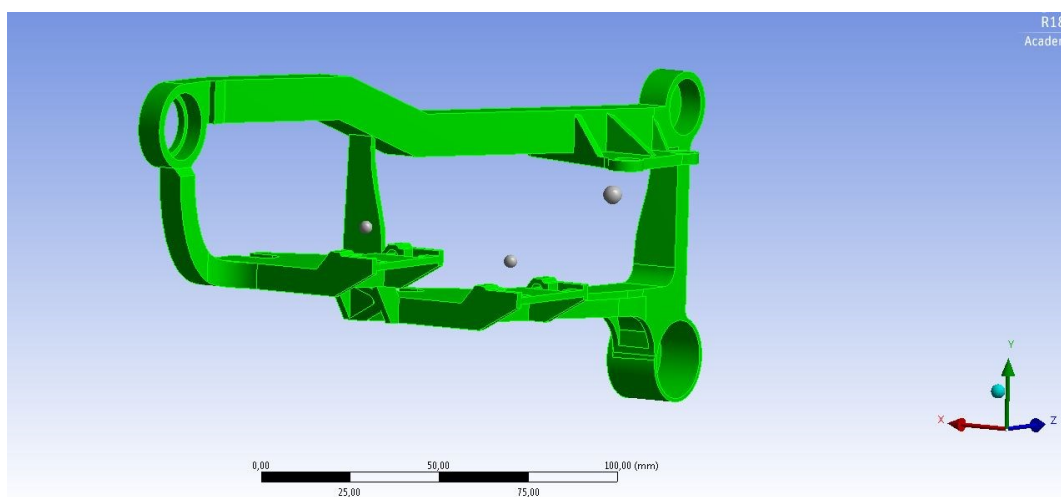
## 4 Měření deformací při statickém zatížení pomocí FEM výpočtů

Měření deformací při statickém zatížení má za úkol zkontrolovat jak pevnostní vlastnosti rámečku, tak také jeho konstrukční řešení. Výpočty probíhaly v závislosti na reálně naměřených datech.

### 4.1 Rozložení deformací a napětí při statickém zatížení rámečku

Výpočet rozložení napětí a deformací na rámečku proběhlo v programu Ansys Workbench 18. Tento software byl vybrán pro výpočet díky dostupnosti na katedře materiálů a technologií pro automobilový průmysl a pro jeho uživatelsky příjemné prostředí.

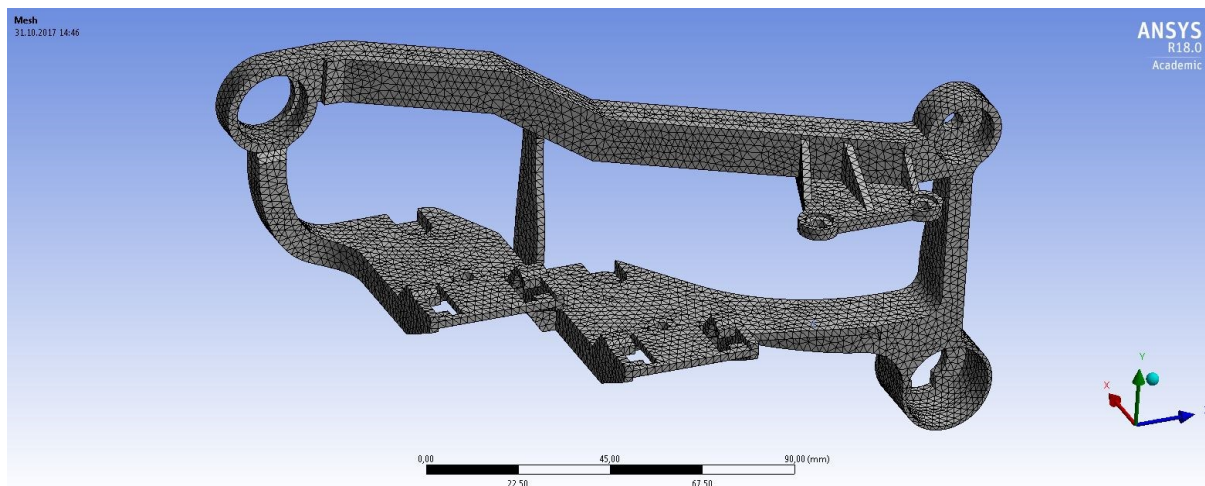
V první řadě bylo zapotřebí do programu zadat materiál rámečku. Pro výpočet byla zvolená předdefinovaná konstrukční ocel. Odpovídala nejbližší svými vlastnostmi použitému materiálu.



Obr. 26 – Rámeček po úpravě geometrie

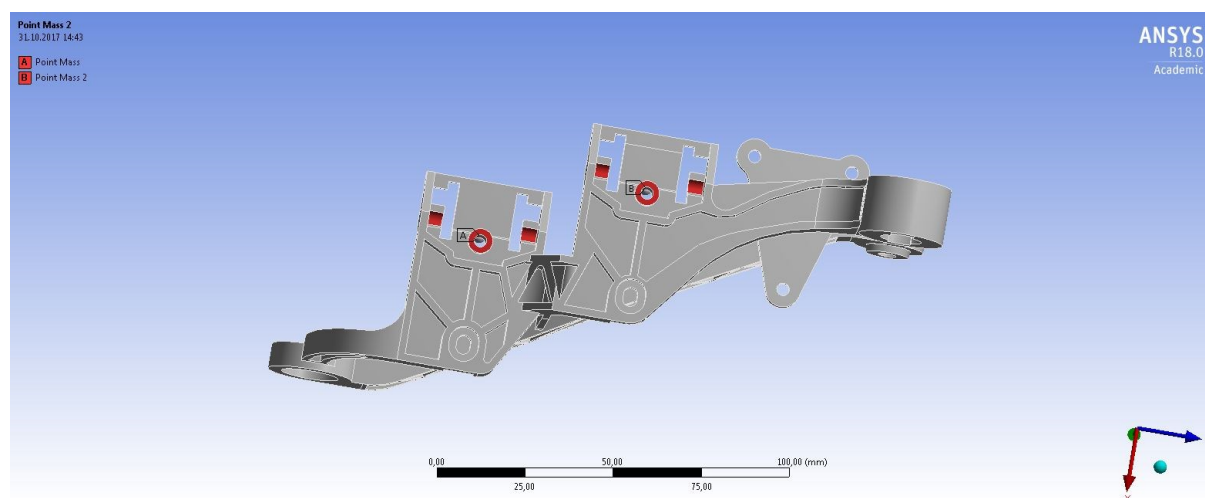
V dalším kroku se nahrála geometrie rámečku (Obr. 26). Ta musela být upravena a zjednodušena pro výpočet. Z tohoto důvodu byly z modelu odstraněny veškeré zaoblení. Tento krok významně pomohl pro tvorbu ideální sítě a k rychlosti výpočtu.

Dále na modelu proběhla tvorba sítě (*Obr. 27*). Díky předešlé úpravě rámečku se vytvořila použitelná a plně vyhovující síť. Pro zpřesnění výsledků byla ještě využita funkce velikosti elementů. Ta byla snížena na hodnotu 2 mm.



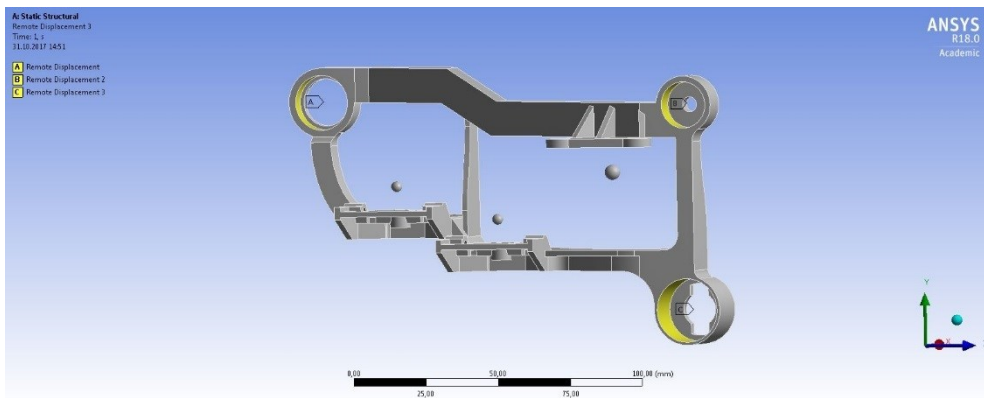
Obr. 27 – Zobrazení sítě na modelu rámečku

Následovalo nahrazení hmotnosti lamp uchycených v rámečku hmotnými body. Pro aplikaci hmotných bodů bylo zapotřebí znát hmotnost jednotlivých světlometů, jejich pozici a v kterých místech zatěžují model. Světlomety uchycené v dolní části rámečku mají každý hmotnost 174 g. Hmotnost do rámečku je vnášena přes tři plochy tak, jak je zobrazeno na (*Obr. 28*). Pozice hmotných bodů se zavádí do těžiště lamp. Světlomet uchycený v horní části má hmotnost 137 g. V tomto případě se hmotnost přenášela opět přes 3 plochy.



Obr. 28 – Plochy, přes které se vnáší hmotnost spodních lamp do rámečku.

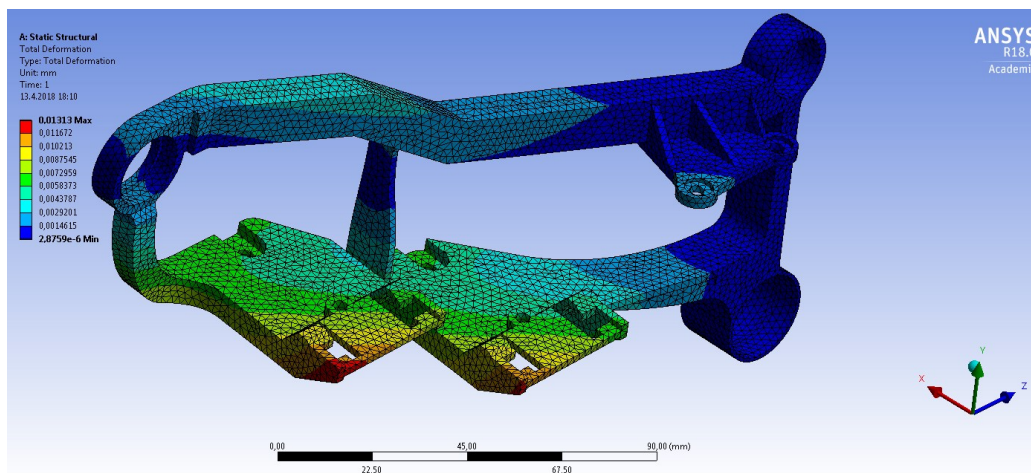
Dále se rámeček musel uchytit vazbami (*Obr. 29*). Jako nejvhodnější byly zvoleny vazby, jenž zabráňují posuvům ve všech směrech a povolují rotace ve všech třech osách. Vazby nahrazovaly klouby, které v místě vazeb reálně jsou.



Obr. 29 – Zobrazení umístění vazeb na rámečku

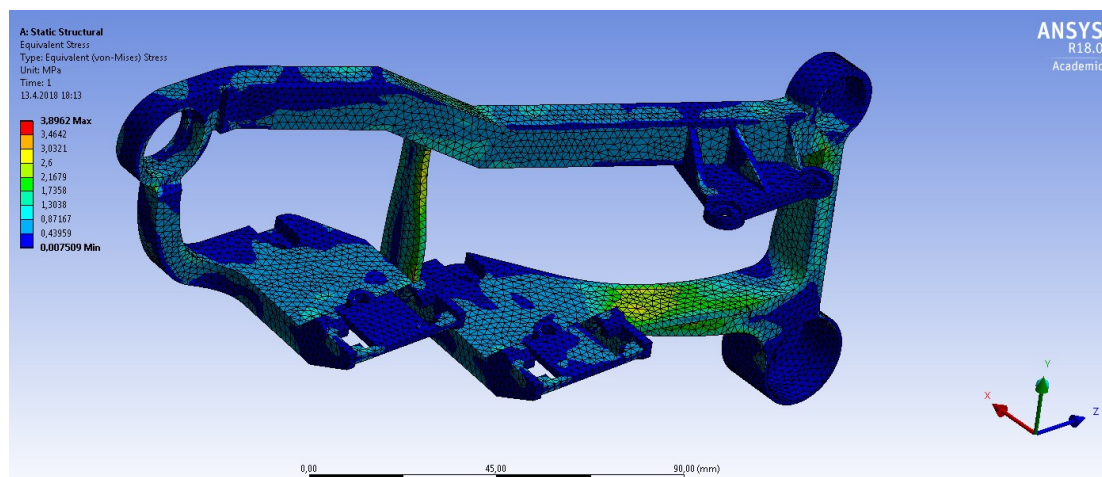
Jako zatížení rámečku bylo zvolena zrychlení, které na rámeček působí při přejezdu příčného prahu v rychlosti 20 km/h. Hodnota zrychlení  $a = 14\,715 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ . Tato hodnota byla zjištěna při testovacích jízdách elektromobilu SCX. V úvahu byl také bráno zrychlení při průjezdu zatáčkou a při prudkém brždění. Zde hodnoty zrychlení dosahovaly značně menších hodnot, a proto nebyly využity k výpočtům.

Po proběhnutí výpočtu jsme získali výsledky o rozložení deformací a napětí na modelu. Při statickém zatížení dochází k maximální celkové deformaci o hodnotě 0,013 mm. Jak je vidět na (*Obr. 30*) maximální deformace působí v rohu úchyty lampy světla. Při pevnosti materiálu nad 300 MPa se jedná o zanedbatelnou deformaci.



Obr. 30 – Zobrazení průběhu deformací v rámečku

Průběh napětí je zobrazen na (Obr. 31). Z něho lze vyčíst se se napětí soustředí do spojnice horní a dolní části rámečku a také do spodní části rámečku. V těchto oblastech napětí dosahuje maximálních hodnot do 3,9 MPa. Jedná se opět o zanedbatelnou hodnotu vzhledem k pevnosti materiálu.



Obr. 31 – Zobrazení průběhu napětí

Lze říci, že rámeček z pevnostní hlediska vyhovuje. Při statickém zatížení rámečku nedochází k jeho poškození.

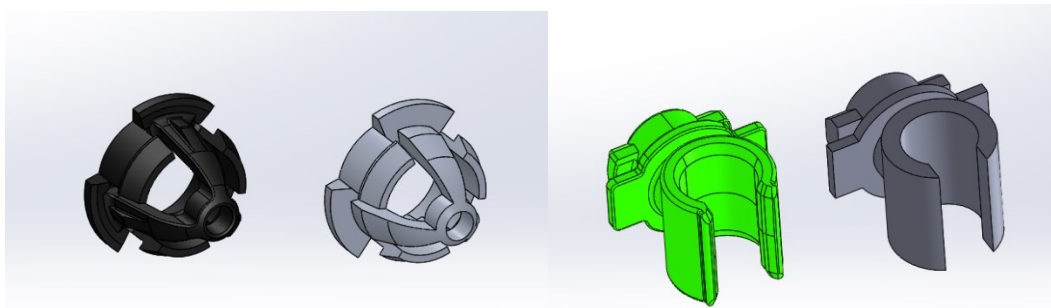
## 4.2 Úprava dílů pro FEM výpočet a 3D tisk

Pro MKP výpočet a 3D tisk bylo zapotřebí některé díly navazující na rámeček upravit. Jednalo se klouby (Obr. 32), které napomáhají s ustavením světel do správné polohy. Klouby se konkrétně starají o výškové a vodorovné nastavení.

Původní díly na první pohled vypadají propracovaně. Mají velice složitou geometrii. Pro MKP výpočet je zapotřebí snížit tvarovou složitost a zachovat základní rysy dílu. Proto byl každý díl znovu překreslen, aby vyhovoval požadavkům. Pro MKP výpočet je důležité vytvoření kvalitní sítě. Výstupní síť zaručí kvalitní výstupní hodnoty výpočtu.



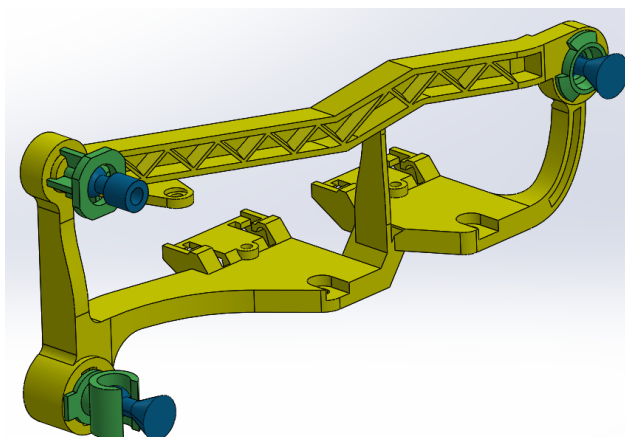
Při rekonstrukci dílů, bylo třeba také pomýšlet na to, že díly budou posléze tisknuty na 3D tiskárně. Díly byly vytisknuty a následně upraveny. Zapotřebí je zcela odstranit podpory vzniklé při tisku a díly pomocí pilníku povrchově upravit.



Obr. 32 – Ukázka úpravy dílů pro MKP výpočet a 3D tisk

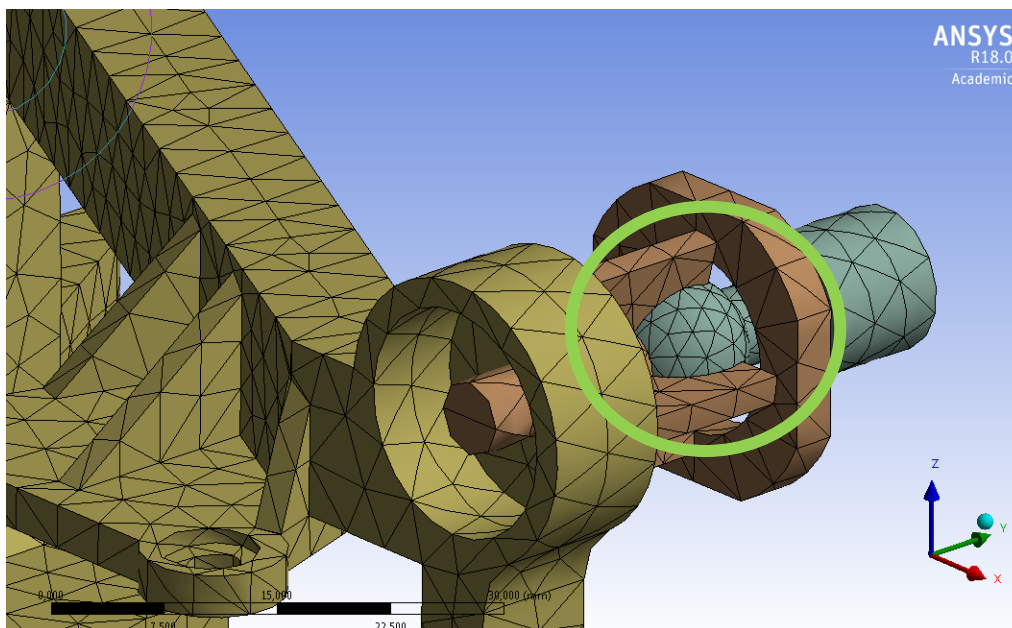
### 4.3 FEM výpočet statického zatížení rámečku

Před samotným výpočtem je nejprve nutné připravit CAD sestavu (*Obr. 33*) s jednotlivými díly. Díly byly naimportovány do společného souboru a následně pomocí vazeb umístěny na svou pozici. Celá sestava pak byla uložena do formátu .step, aby mohla být dále využita při FEM výpočtech. Formát .step byl vybrán pro svou univerzálnost a možnost importu do softwaru Ansys Workbench 18.



Obr. 33 – 3D model sestavy rámečku s klouby

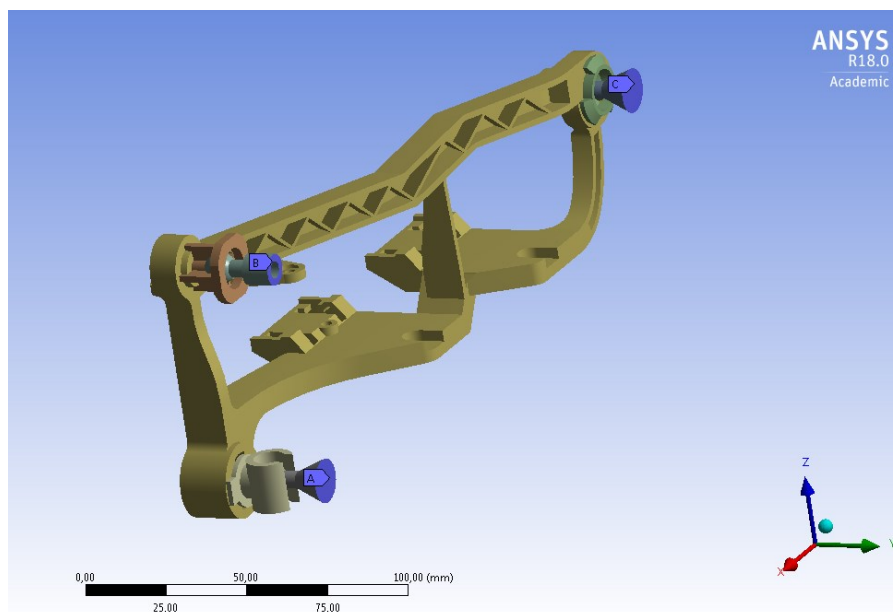
Geometrie rámečku společně s klouby byla nahrána do prostředí výpočetního programu tak, aby jednotlivé díly na sobě nebyly závislé. Kompletně se jedná o sedm dílů. V dalším kroku bylo zapotřebí vysíťovat jednotlivé součásti. Velikost elementu byla stanovena pro všechny těla na čtyři milimetry. Dále se pak síť zjemňovala pro konkrétní plochy, které byly ve vzájemném kontaktu. Pro větší přesnost výsledků byla síť v těchto místech zjemněna na velikost elementů dva milimetry. Na obrázku (Obr. 34) v zeleném kruhu lze vidět konkrétní snížení velikosti elementů.



Obr. 34 – Názorná ukázka zjemněné struktury

Po vysíťování všech částí následovala tvorba kontaktů mezi jednotlivými díly. Některé kontakty byly již automaticky vytvořeny, nicméně bylo je třeba zkontrolovat, upravit a případně dodělat takové, které chyběly. Kontakty v kulových kloubech byly řešeny pomocí třecích kontaktů. Kontakty mezi kulovými klouby a rámečkem byly řešeny jako lepený kontakt. Tyto kontakty se nejvíce blíží reálnému stavu. Dále bylo třeba nastavit okrajové podmínky. Okrajové podmínky (Obr. 35) byly zavedeny na zadní plochy kulových kloubů, tak aby byl celý rámeček uchycen v prostoru. Zvoleny bylo vetknutí, tím se odebraly všechny stupně volnosti.





Obr. 35 – Zobrazení umístění okrajových podmínek sestavy

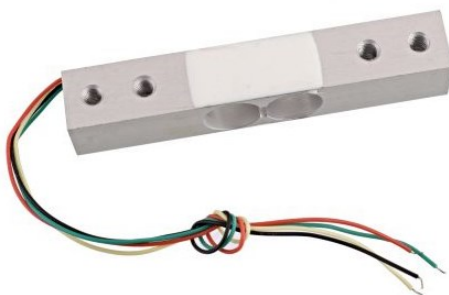
Po tomto kroku už jen zbývalo zavést do modelu sílu, která bude působit na těžiště prostředního světloometu. Síla působí ve směru osy Z a má za úkol simulovat přejezd příčného prahu. Dále nezbývalo nic jiného než spustit výpočet. Po spuštění výpočtu však nedošlo k jeho dopočtení. Důvodem byla složitost nastavených kontaktů. Kontakty se nepovedlo v softwaru Ansys Workbench 18 nastavit tak, aby splnily požadavky pro výpočet. Z tohoto důvodu jsem oslovil Ing. Miroslava Suchánka a obrátil se na něho s prosbou o pomoc. Z dohody vyplynulo, že vstupní podmínky pro výpočet zůstanou zachovány, ale nastavení kontaktů a výpočet proběhne v sofistikovanějším softwaru Patran.

## 5 Měření deformací při statickém zatížení metodou DIC a 3D scan

Měření metodou DIC a 3D scan probíhalo v laboratořích katedry materiálů a technologií pro automobily. Tyto metody jsou běžně používány v technické praxi. Cílem tohoto měření bylo změřit deformace při zatížení odpovídajícímu jízdnímu stavu při přejetí příčného prahu.

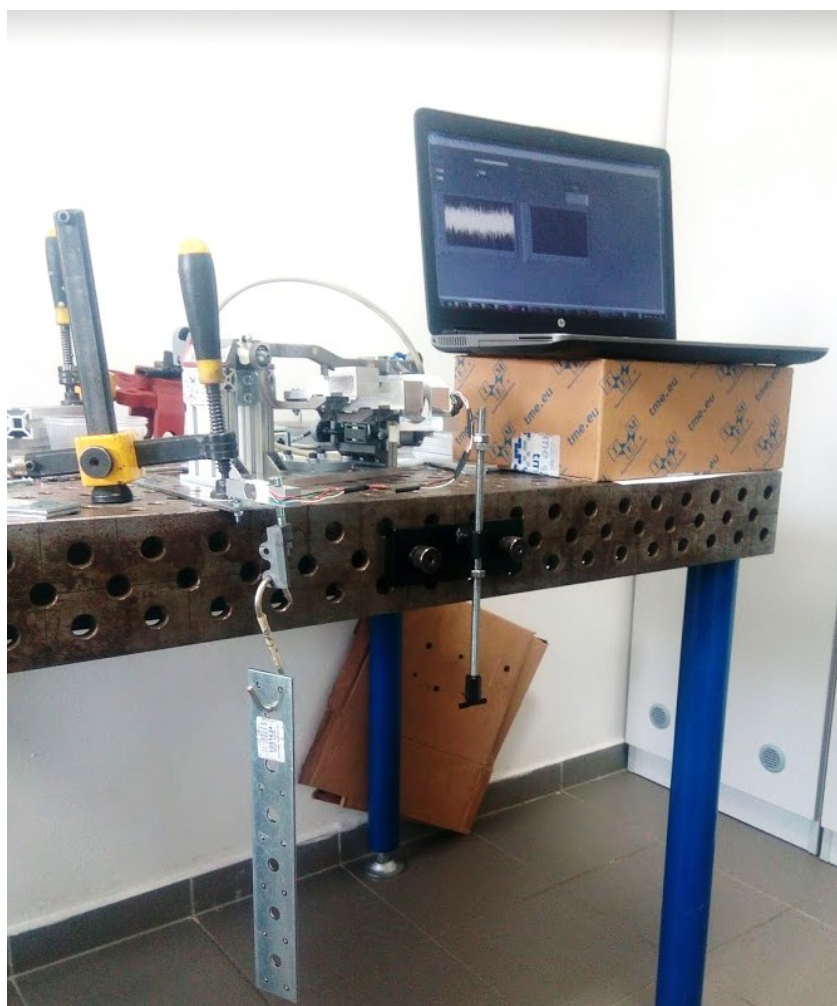
### 5.1 Váhový senzor pro určení síly při zatížení rámečku světlometu

Pro měření síly při zatížení rámečku světlometu byl zvolen tenzometrický senzor s jmenovitým zatížením tři kilogramy (*Obr. 36*). Pro případ nutnosti většího zatížení byl také připraven senzor s jmenovitým zatížením deset kilogramů. Tento senzor byl zvolen z předpokladu, že se na zatížení rámečku nebude vyvíjet větší síla. Díky využití tohoto senzoru bylo zapotřebí upravit jak senzor, tak také přípravek pro zatěžování. V senzoru byl převrtán závit z rozměru M4 na díru o průměru osm milimetrů. Stalo se tak, aby se mohl senzor nasunout na závitovou tyč a podepřít dvěma maticemi. Druhá strana senzoru byla pevně ukotvena přes šroub a dvě pomocné matice ke světlometu.



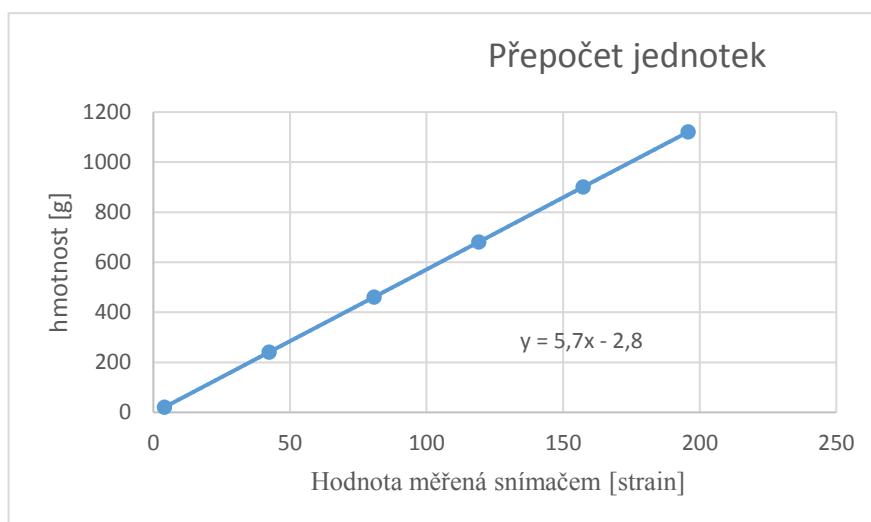
Obr. 36 – Váhový senzor 3 kg [21]

Senzor bylo třeba také před samotným měřením zapojit a zkalibrovat. Zapojení proběhlo skrz napojení LAN kabelu a kabelů vycházejících ze senzoru. LAN kabel byl pak napojen na měřicí kartu a dále přes USB do počítače. Data se vyhodnocovala v již předem připraveném programu vytvořeném v prostředí softwaru LabVIEW. Kalibrace probíhala pomocí postupného zatěžování siloměru kovovými destičkami (*Obr. 37*), které byly předem zváženy. Každá z nich měla 220 gramů. Hodnoty, které siloměr vykazoval, byly zobrazeny v LabVIEW v jednotkách strain. Proto bylo třeba zjistit vzájemnou závislost naměřených a reálných hodnot. Data byla zavedena do programu Excel a byl vytvořen graf z těchto hodnot (*Obr. 38*). Následně byla vytvořena spojnice trendu popsána rovnicí. Vztah mezi hodnotami byl lineární. Rovnice pro přepočet se poté vložila do programu v LabVIEW a ten již ukazoval reálné hodnoty v gramech. Takto připravený snímač byl poté nainstalován do své aplikace na rámečku světlometu.



Obr. 37 – Průběh kalibrace siloměru

snímač [strain]	závaží [g]
3,94	20
42,3	240
80,76	460
119,03	680
157,32	900
195,7	1120



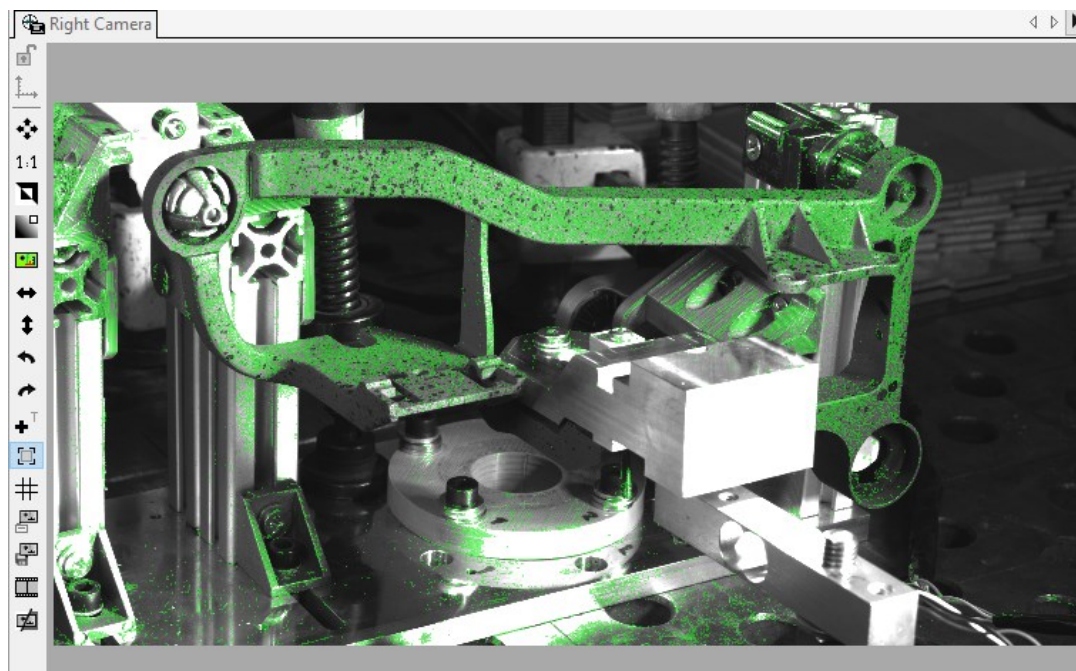
Obr. 38 – Přepočet jednotek

## 5.2 Příprava pro měření deformací metodou DIC

Před samotným měřením deformací je potřeba provést několik nutných úkonů. V první řadě je potřeba otevřít v softwaru MercuryRT nový projekt ve formě měření v reálném čase. Následně se vybrala možnost stereokamer a z nabídky se obě dostupné aktivovaly.

Dalším krokem je nastavení osvětlení scény a nastavení hloubky ostrosti s clonou na kamerách. Pro osvětlení jsou použity dvě výkonné LED zářivky. Musí být nastaveny tak, aby objekt nevrhal žádné stíny a nekazil tak možnost skenování. Clona s hloubkou ostrosti se nastavuje manuálně na kameře pomocí otočných ovladačů. Pro zvládnutí tohoto kroku slouží nástroje aplikace, ve kterých je možno si ověřit správnost nastavení. Pro hloubku ostrosti slouží nástroj, který na povrchu skenované součásti vytvoří zelené pole (Obr. 39). Objeví se na povrchu vždy po zaostření na určitou část objektu. Lze tak korigovat jakou část objektu budeme skenovat a vyhodnocovat. Pro nastavení clony složí nástroj, který dokáže identifikovat přesvícené, nebo podsvícené oblasti. Červenou barvou označí ty místa, která jsou přesvícená, naopak modrou barvou pak označí ty části, které jsou podsvíceny. Správným nastavením clony, lze tento parametr nastavit. Pokud je obraz přesvícený i po úplném uzavření clony, je potřeba přejít k nastavení závěrky v softwaru MercuryRT. Ta ovlivňuje to, kolik světla se dostane na citlivý snímač. Obecně se pro skenování využívá automatické závěrky, která se postará o nastavení. V našem případě byl objekt rámečku stále přesvícen a bylo zapotřebí snížit hodnotu na deset milisekund z automaticky nastavených dvaceti. Oba kroky se povedly nastavit, a proto bylo

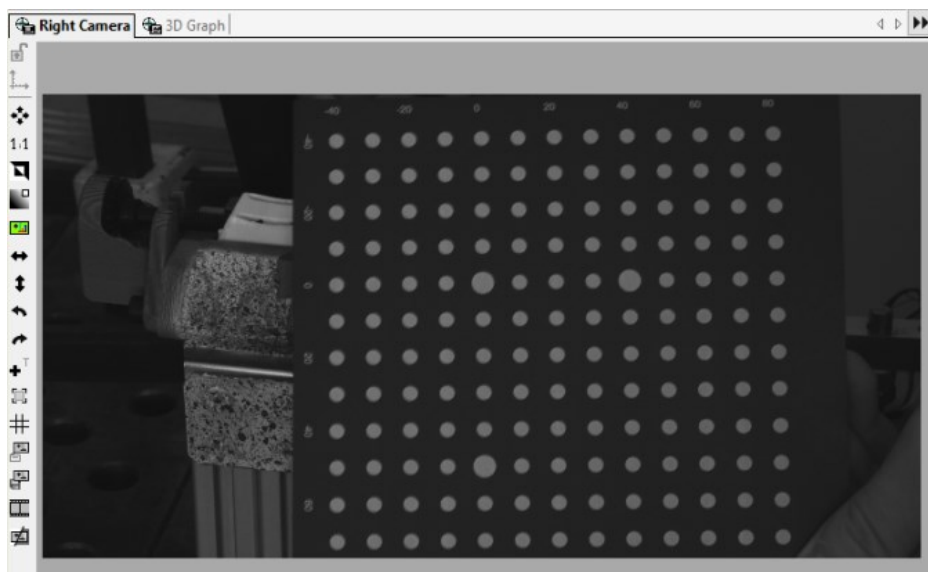
možné přejít k samotnému skenování. Výhodou tohoto typu skenování je, že stačí danou scénu zachytit při zatěžování jen jednou a všechny následující úpravy lze editovat na onom záběru.



Obr. 39 – Zaostření na rámeček světlometu

Po zvládnutí těchto kroků následovala kalibrace obou kamer. Kalibrace se provádí za použití kalibračních desek s body. Výběr velikost kalibrační desky je vždy závislý od velikosti skenované součásti. V našem případě byla využita deska se vzdálenosti bodů 5 mm, protože se svou velikostí nejlépe vyhovovala. Dalším krokem ke kalibraci je nafotit desku z různých úhlů pomocí kamer (*Obr. 40*). Důležité je, aby na každém snímku obou kamer, šly vidět všechny tři body, které mají dvojnásobnou velikost. Tyto body definují rovinu. Potřeba je také různorodost pozic kalibrační desky na snímcích. Desku je třeba natáčet do různých úhlů a poloh. Počet snímků pro kalibraci není definován. Z vlastní zkušenosti bylo zjištěno, že okolo třiceti snímků postačí k přesné kalibraci. Aby mohla být kalibrace považovaná za úspěšnou, hodnota odchylky se musí pohybovat okolo jednoho pixelu. Této hodnotě jsme se přiblížili, a proto bylo možné kalibraci považovat za úspěšnou. Hodnota nepřesnosti byla 0,5 px.

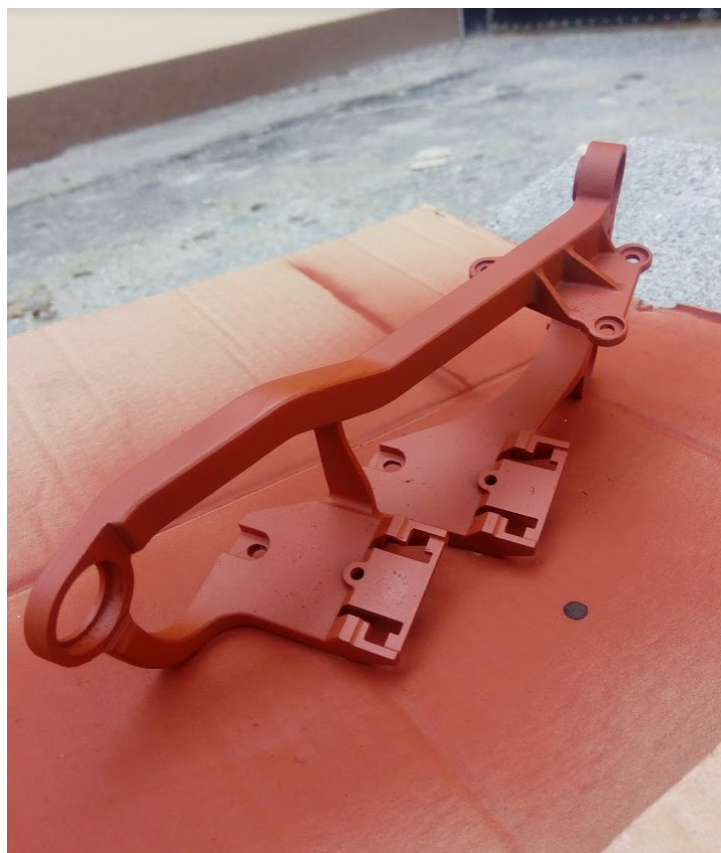




Obr. 40 – Průběh kalibrace kamer systému MercuryRT

### 5.3 Příprava rámečku pro skenování metodou DIC

Před skenováním rámečku automobilu je ho zapotřebí připravit. Rámeček svým vnějším vzhledem povrchu neodpovídá požadavkům metody. Jeho povrch měl jednodlitou barvu a na



Obr. 41 – Nanesení základové barvy na rámeček

funkčních plochách byl lesklý. Tyto problémy bylo nutné odstranit. Proto se na povrch rámečku v částech, kde bude podroben skenování, nanasla nejprve základová barva. Na výběr byly dvě možnosti, hnědá a bílá. Z přechozích zkušeností se bílá základová barva jevila jako příliš světlá pro skenovací scénu. Z tohoto důvodu byla za základovou barvu vybrána hnědá. Poté co byla barva nanesena (*Obr. 41*) na rámeček bylo nutné vyčkat třicet minut, než barva zaschne. Na základovou barvu bylo třeba naprášit patern. Pro tuto aplikaci byla zvolena černá barva. Na rámeček bylo třeba nanést unikátní kapkovitý povrch. Toho bylo dosaženo jemným stisknutím aplikátoru spreje a postupným nanášením na všechny části. V potaz je třeba brát to, že kapky nesmí být příliš malé, ale ani příliš velké. V případě nevyhovující velikosti nasprejovaných kapek software správně nerozezná nanesený patern.

## 5.4 Skenování rámečku světlometu metodou DIC

Samotné skenování bylo zaměřeno na přední a vrchní část rámečku světlometu. Odstraněny byly dvě boční náhrady světla, aby bylo na rámeček vidět. Síla se tedy při testu bude zaměřovat pouze do těžiště středního světla. Síla, která bude působit na rámeček skrz závitovou tyč a snímač, byla vypočtena z měření při reálném přejezdu příčného prahu při rychlosti 20 km/h. Zrychlení ve svislém směru  $a = 14,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  bylo převzato z protokolu o měření při přejezdu příčného prahu. Hodnota působící síly byla vypočtena následovně:

$a = 14,7 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}]$  – zrychlení ve svislém směru

$m = 0,832 \text{ [kg]}$  – hmotnost sestavy (světlometry – 0,485 kg, rámeček – 0,347 kg)

pak tedy zatěžující síla  $F = a \cdot m = 14,7 \cdot 0,832 = 12,2 \text{ N}$

Nicméně velikost této síly je poměrně malá a na výsledném skeneru by nemusely být posuvy a případné napětí tak dobře viditelné, rozhodl jsem se proto působit na rámeček silou dvojnásobnou. Vycházím tak z předpokladu lineárního nárůstu tíhového zrychlení při přejezdu příčného prahu v rychlosti 40 km/h. Konečná síla, kterou se bude působit na rámeček, je tedy 24,4 N. Síla byla také vybrána vzhledem k senzoru s jmenovitým zatížením tři kilogramy.

Než došlo ke skenování, bylo třeba zapnout LED zářivky a zkontrolovat připojení snímače k měřicí kartě a k počítači. První měření bylo bráno pouze jako kontrolní. Z tohoto důvodu byl rámeček zatížen jen silou 5 N. Na rámeček byly ještě rozměřeny a nakresleny body černým fixem. V těchto bodech se budou měřit posuvy. Body byly nakresleny a rozměřeny tak, aby se

daly aplikovat ve FEM modelu a byla zajištěna porovnatelnost naměřených dat. Kontrolní měření dopadlo úspěšně a všechno fungovalo dle předpokladů.

Po kontrolním měření byl siloměr uvolněn do základní polohy a znovu zkalibrován na nulu. Po tomto úkonu již nic nebránilo naměřit finální data. Skenování bylo spuštěno a postupným otáčením závitové tyče se snímačem docházelo k zatěžování (*Obr. 42*). Otáčením závitové tyče se zatížení dostalo až na potřebných 24,4 N. Zde byla síla ustálena a měření ukončeno.



Obr. 42 – Skenování rámečku světlometu

## 5.5 Úprava naměřených dat v softwaru MercuryRT

Jak už bylo výše zmíněno, na rámečku byly nakresleny body, ve kterých se pro možnost porovnatelnosti s FEM modelem budou měřit posuvy. Aby nám software vykreslil průběhy a maximální posuvy těchto bodů, je zapotřebí bodům nakresleným a viditelným na obraze přiřadit



body virtuální, respektive výpočetní. Děje se tak postupným výběrem bodů v prostředí softwaru. Body jsou označeny svým číslem, aby je bylo možné poté rozklíčovat v automaticky vytvořeném grafu posuvů (*Obr. 43*). Pro měření napětí bylo zapotřebí na rámečku vytvořit měřicí pole. Ty se zadávají jednoduchým naklikáváním bodů, které se spojí ve výpočetní plochu. Ta se následně po zatížení zbarví dle odpovídajícího napětí.



Obr. 43 – Zobrazení výpočetních bodů

## 5.6 Měření deformací metodou 3D scan

Tato metoda byla vybrána díky své dostupnosti na katedře a také z důvodu možnosti porovnat výsledky s metodou DIC a FEM výpočtem. Dalším z důvodů byla možnost porovnání dvou metod fungujících na rozdílných principech.

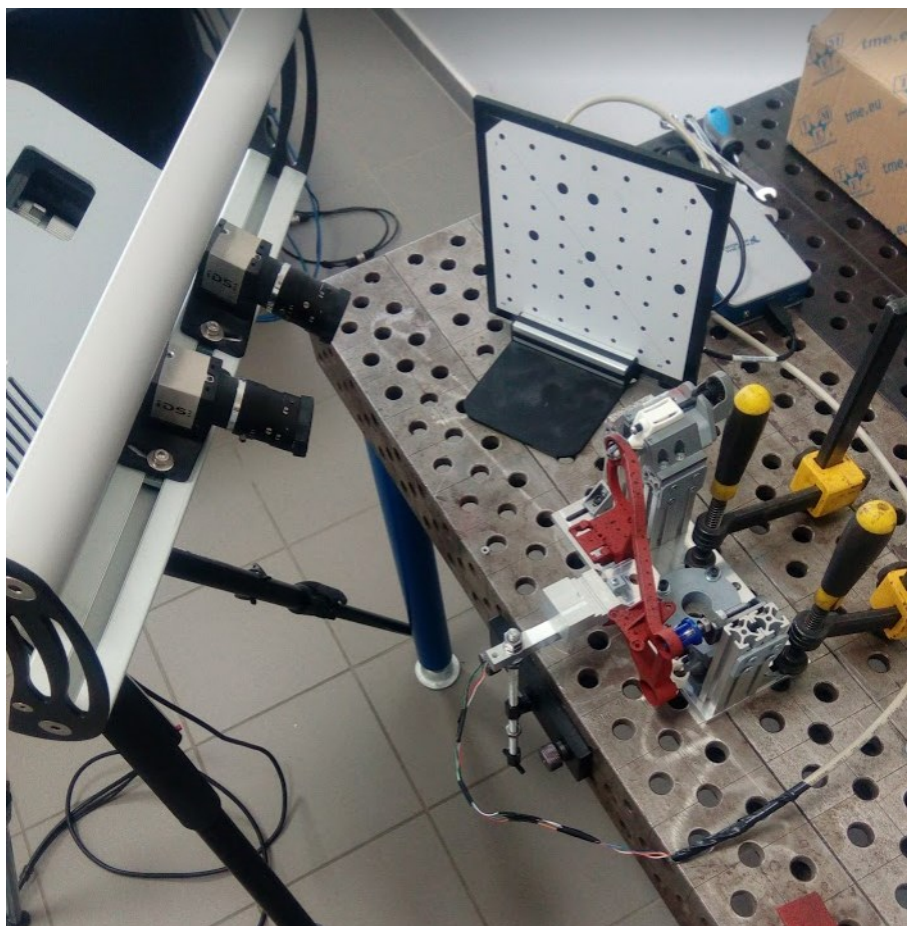
Měření deformací metodou 3D scan probíhalo na optickém skenovacím zařízení RangeVision 3D. Jedná se o přístroj schopný skenovat předměty různých tvarů a velikostí. Díky technologii strukturovaného osvětlení jsou vhodné pro skenování jakéhokoli objektu, od malých věcí typu šperku po velké typu automobilu. Přesnost tohoto přístroje až 0,018 mm.

Skenování rámečku automobilu probíhalo ve stejné laboratoři jako skenování předchozí. Po dokončení skenování metodou DIC se do stejné polohy postavil skener druhý. Využilo se tak toho, že rámeček je již zatížený, a proto se data z obou skenů budou snadněji a přesněji porovnávat. Průběžně se také kontrolovalo, zdali je rámeček stále zatížen potřebnou silou 24,4 N. Následně se rámeček naskenoval také po uvolnění zatížení pro určení posunutí měřených bodů.

Pro tento typ skenování je důležitým parametrem povrch skenovaného předmětu. Povrch se nesmí lesknout nebo mít černou barvu. Rámeček byl před prvním skenováním nastříkán hnědou základovou barvou, a proto byl tento problém již vyřešen.

Před začátkem skenování je zapotřebí nastavit osvětlení scény, nastavit pozici kamer a kamery zkalibrovat. Osvětlení probíhá za pomoci vlastního projektoru, který zároveň promítá i strukturované světlo při skenování. Objekt nesmí být ani přesvícen, k tomu slouží nástroj, který zbarví skenovaný předmět na obrazovce do červena a nesmí být ani tmavý, že nejde na obraze vidět. Přesvícení nebo málo světla lze korigovat buďto za pomoci mechanického otočného ovladače na kameře, nebo pomocí virtuálního ovladače v aplikaci, který upravuje svítivost projektoru. Pokud jsou tyto podmínky splněny objekt je správně nasvícen. Poté je třeba nastavit správnou pozici kamer tak, aby snímaly předem připravenou kalibrační desku. Ta se musí nacházet v takové vzdálenosti v jaké bude skenovaný objekt od skeneru. Poté se kamery přesně ustaví tak, aby vnější obrys kalibrační desky kopíroval virtuální obrys na obrazovce. Nakonec se pomocí mechanického ovladače nastaví zaostření kamer. Posledním krokem je kalibrace. Funguje na stejném principu jako u předchozí metody. Před kamery se v předem určených krocích nastavuje kalibrační deska a kamery jí postupně snímají. Po ukončení snímání program sám vyhodnotí velikost odchylky.

Po zdárném dokončení kalibrace na řadu přichází samotné skenování (*Obr. 44*). To probíhá v několika krocích, kdy se postupně rámeček snímá z různých úhlů. Tento postup je zapotřebí, protože nelze z jednoho úhlu a pozice skeneru nasnímat všechny potřebné plochy a části rámečku. Skenování bylo primárně zaměřeno na čelní a horní část rámečku. Skeny z různých míst byly nasnímány a uloženy pro další úpravu.



Obr. 44 – Průběh skenování optickým skenerem při zatížení rámečku

## 5.7 Úprava naskenovaných dat

Data, která byla naskenována, je zapotřebí upravit. Na jednotlivých skenech se objevuje nevyžádaný šum a naskenované objekty z okolí. Sken je tak příliš veliký a špatně se s ním pracuje. Dalším úkonem je pak pomocí funkce v aplikaci spojit skeny do jednoho.

Úprava a odstraňování nežádoucích částí skenů probíhá přes nástroje v aplikaci. Jedná se o výběry částí skenů ve 2D, nebo 3D. Postupně tak lze z jednotlivých skenů odstranit téměř vše nežádoucí. V případě, že nelze ručně odmazat všechny nežádoucí drobnosti na skenech, je možné ještě využít automatické odstraňování nežádoucích částí. Zde se nastaví velikost objektů, které mají zmizet.

Dalším krokem je spojení jednotlivých skenů dohromady. K tomu lze dojít dvěma způsoby. Buďto využít automatické spojení, nebo využít ruční spojení pomocí společných bodů. V první řadě jsem využil možnosti automatického spojení, bohužel toto spojení se nepovedlo dle

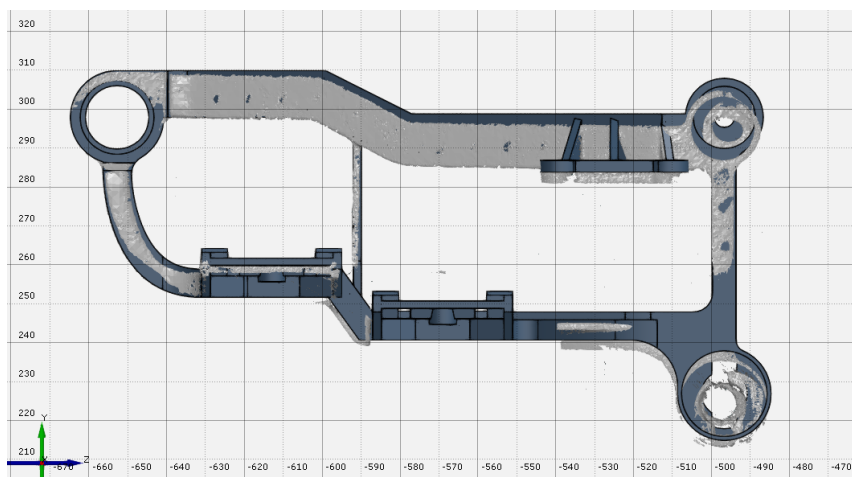
představ. Přikládám to složitosti naskenované součásti. Dalším postupem tedy bylo spojit skenované součásti pomocí dvojic shodných bodů. Tímto způsobem se pak podařilo dosáhnout plně spojených skenů. Výsledný spojený sken je pak potřeba uložit jako celek ve formátu .stl. dále bude použit ve srovnávacím softwaru.

## 5.8 Srovnání skenu a CAD modelu

Pro srovnání jsou vždy zapotřebí dva druhy dat. Pro kontrolu deformace rámečku se využilo možnosti sken porovnat s nedeformovaným CAD modelem. Jako druhý typ se do softwaru importoval upravený a složený naskenovaný rámeček automobilu po zatížení. Pro složení dvou skenů a následné vyhodnocení se využil software GOM Inspect 2017.

Nejprve bylo zapotřebí naimportovat postupně oba modely. Prvním byl CAD model. Při importu je nutné vybrat, zdali chceme model ve formě CAD nebo mraku bodů. V tomto případě jsme zvolili CAD. Bylo tak učiněno, jelikož se výsledná mapa odchylek zobrazuje právě na CAD modelu a svou geometrií je úplný. Grafický výstup je poté také lepší. Skenovaný model se naimportoval naopak jako mrak bodů a slouží k vytvoření mapy odchylek na CAD modelu.

Dalším krokem je spojení dvou skenů (*Obr. 45*). To může probíhat za pomoci několika funkcí a nástrojů v softwaru. V mém případě se jednalo o nástroje dva. Prvním z nich bylo pomocné automatické spojení dvou skenů. Postup je takový, že se označí dva žádané modely pro spojení a program automaticky dle nejlepší shody skeny spojí. Toto řešení zároveň vypíše, s jakou odchylkou skeny spojilo. V mém případě se jednalo o jednu desetinu milimetr. Pro lepší a přesnější spojení je v softwaru funkce, které dokáže zpřesnit spojení pomocí volby, která dokáže skeny spojit dle určité části geometrie.



Obr. 45 – Spojení CAD modelu se skenem rámečku před dodatečnou úpravou

Po dokončení tohoto spojení přichází na řadu tvorba barevné mapy s odchylkami. Ta se vytvoří tak, že se pomocí nástroje aplikace nechají vykreslit odchylky skenu na CAD modelu. Tímto krokem se zjistí, zdali byl samotný rámeček při zatížení deformován či nikoli.

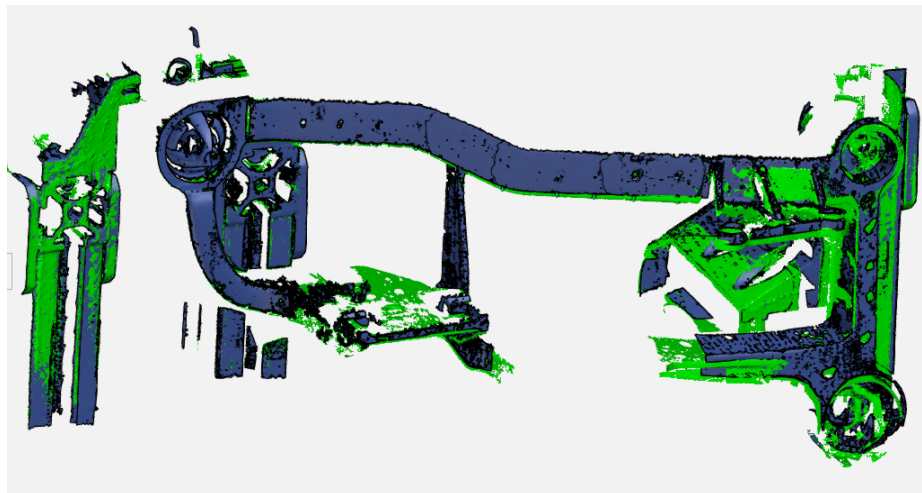
## 5.9 Srovnání skenů před a po deformaci

Toto srovnání bylo nutno provést, abychom zjistili, zdali dochází u námi určených bodů k posunutí. Proto jsem rámeček naskenoval znova i po uvolnění zatížení. Důležitým krokem při tomto skenování bylo také zachytit určitou část standu rámečku. Díky tomu šly skeny následně spojit dle částí, které se při zatížení nepohnuly. Tímto jsme získali vizualizaci posunutí a možnost změřit posunutí pro námi určené body (*Obr. 46*).

Spojení skenů probíhalo na stejném principu jako v minulé kapitole. Rámečky se nejprve v prostoru srovnaly dle automatické funkce v softwaru. Následně se zpřesnilo spojení skenů dle námi určené geometrie. V tomto kroku se spojování liší. Zde se pro spojení využilo naskenovaného standu v pozadí.

Pro určení posunutí bylo zapotřebí na dvou skenech vytvořit body, které korespondovaly svou polohou s polohou měřených bodů u metody DIC. Pro názornost se vytvořily pouze dvojice bodů T1 až T10. Dalším důvodem byla horší kvalita skenů, která znemožňovala lokalizaci bodů dalších. Body byly vytvořeny na horních hranách skenů a mezi nimi byly dále vytvořeny

úsečky. Následně se změřila velikost úsečky a data byly zaznamenány do tabulky pro vyhodnocení měření.



Obr. 46 – Spojení skenů za pomoci standu rámečku

## 6 Vyhodnocení naměřených dat

Výsledky k vyhodnocení jsou získány pomocí tří různých metod. První měření proběhlo pomocí metody DIC, druhé měření se zaměřilo na metodu 3D scan a třetí metodou byla FEM analýza. Všechny tyto metody jsou integrální součástí nejen automobilového průmyslu, ale průmyslu jako takového. Vyhodnocení proběhne na základě porovnání posuvů předem daných bodů a zhodnocení naměřených napětí.

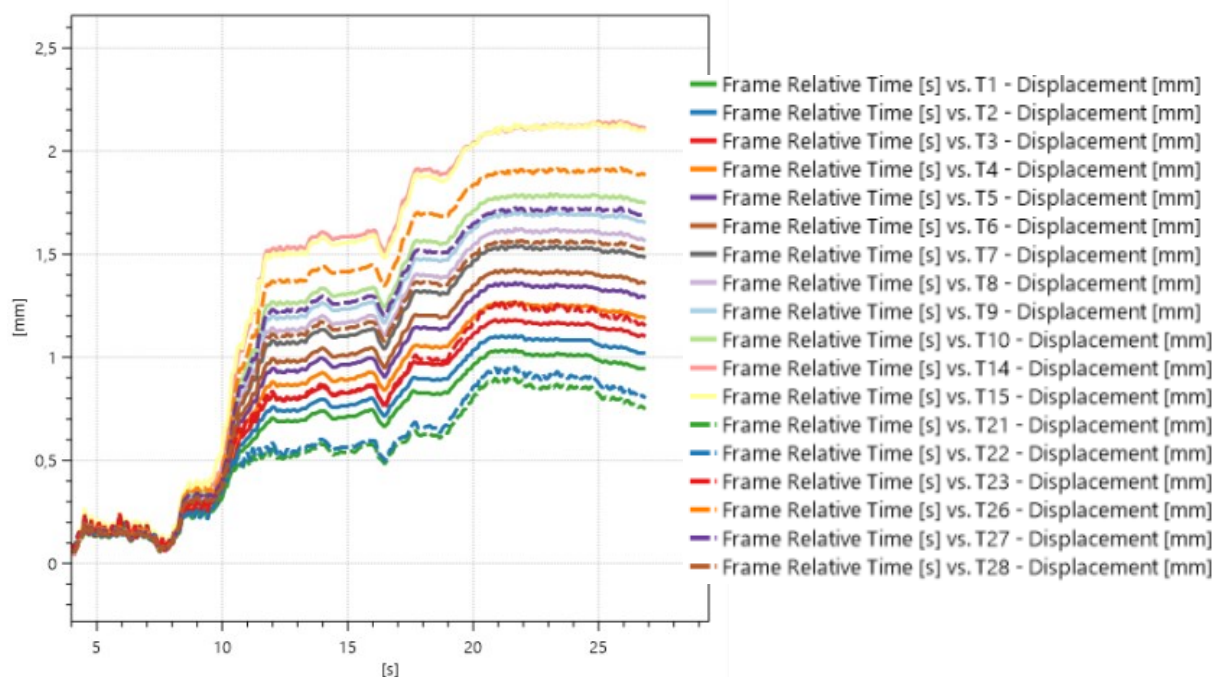
### 6.1 Vyhodnocení naměřených dat metodou DIC

V prvé řadě byl nahrán v softwaru kamerový záznam a následně byly zadány body a měřicí pole, ve kterých se měřily posuvy a napětí. Mezi výhody metody patří možnost editovat jeden záznam z kamer kolikrát chceme a potřebujeme. Můžeme tak přidávat nebo odebírat body či pole měření dle potřeby. Výsledkem mého měření byl pak graf posuvů jednotlivých bodů a grafické znázornění průběhu napětí na měřených plochách.

Jak je patrné z obrázku (*Obr. 47*) průběh zatížení není lineární. Stalo se tak z důvodu otáčení závitové tyče. Nicméně tato skutečnost nijak neovlivňuje konečné výsledky posuvů nebo napětí. Otáčení závitovou tyčí skončilo v momentě, kdy se docílilo výsledné zátěžné síly 24,4 N. Po ustálení této síly se měření přerušilo.

Z grafu lze jasně vyčíst, že rozdíly posuvů jsou v poměrně výrazném rozptylu od 0,75 mm až k hodnotám přesahujícím 2 mm. Tento výrazný rozdíl přisuzuji různým polohám bodů vzhledem k působišti síly (*Obr. 48*) a také nízké tuhosti a vůli ve vazbách kloubů. Pro lepší pochopení a přehlednost jsem vytvořil tabulku srovnávající maximální odchylky bodů (*Obr. 49*).





Obr. 47 – Celkový graf posuvů jednotlivých bodů



Obr. 48 – Pozice bodů na rámečku

Body v tabulce jsem záměrně rozdělil pomocí barevného označení do několika sekcí. První sekcí jsou body T1 až T10. Na čele horní spojnice rámečku a jdou vzestupně zleva doprava. Z velikosti posunutí je jasně patrné, že stejně narůstá i hodnota posunutí. Konkrétně je to od 0,968 mm až do 1,779 mm. Další sekcí jsou body T14 a T15 opět můžeme sledovat trend, že bod více položený vpravo vykazuje větší hodnotu posunutí. Zároveň se jedná také o maximální naměřené posunutí a to 2,138 mm. Třetí sekcí jsou body T21 až T23. Tyto body se nachází na levé spojnici horní a dolní části rámečku a na pozici uchycení levého světlometu. Jako v předchozích dvou případech se projevuje trend nárůstu posunutí zleva doprava. Hodnoty se zde pohybují od 0,791 mm do 1,199 mm. Zároveň je první jmenovaná hodnota, tedy 0,791 mm, minimem naměřeným v rámci posunutí bodů. Poslední skupinou jsou body T26 až T28. Tyto body se nachází na horní ploše spojnice rámečku. Potvrzují trend, který se objevuje u všech



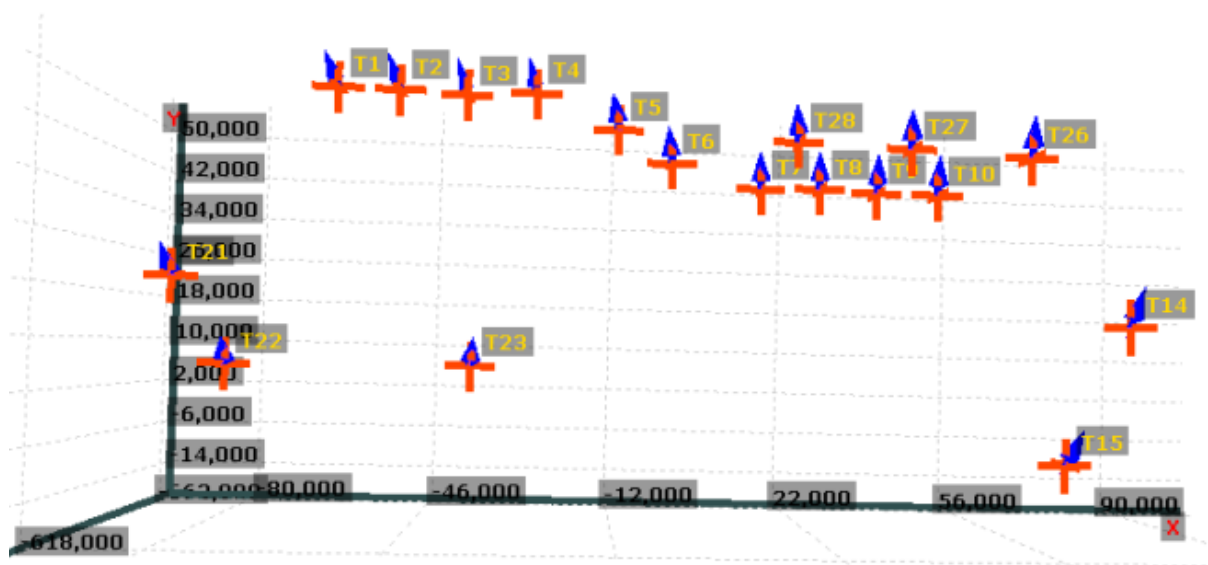
skupin. Body postupně navyšují své posunutí zleva doprava. Nejnižší hodnotu v této skupině má bod T28 1,556 mm a nejvyšší bod T26 1,909 mm.

Metoda DIC	
Bod	Posunutí [mm]
T1	0,97
T2	1,04
T3	1,13
T4	1,22
T5	1,33
T6	1,40
T7	1,52
T8	1,60
T9	1,69
T10	1,78
T14	2,14
T15	2,13
T21	0,80
T22	0,85
T23	1,20
T26	1,91
T27	1,72
T28	1,56

Obr. 49 – Tabulka se srovnáním posuvů bodů

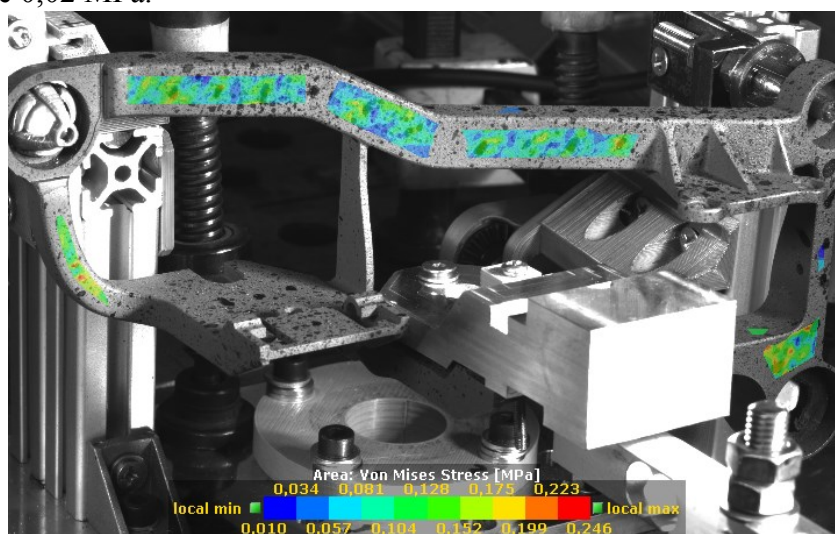
Obecně lze tedy pro všechny body rámečku konstatovat, že čím je měřený bod svou polohou více vpravo, tím dochází k většímu posunutí. Nejvíce pravděpodobnou příčinou tohoto jevu je fakt, že pravý spodní kloub má krom rotací ve všech směrech uvolněný také pohyb ve svislé ose. Z kamerového záznamu je patrné, že k deformaci dochází především v plastových kloubech rámečku. Tyto oblasti jsou zodpovědné za velikost posunutí bodů.

Na obrázku (*Obr. 50*) lze vidět, že trend posuvu bodů u všech bodů je velice podobný. Tudiž se body rámečku pohybují přibližně ve stejném směru.

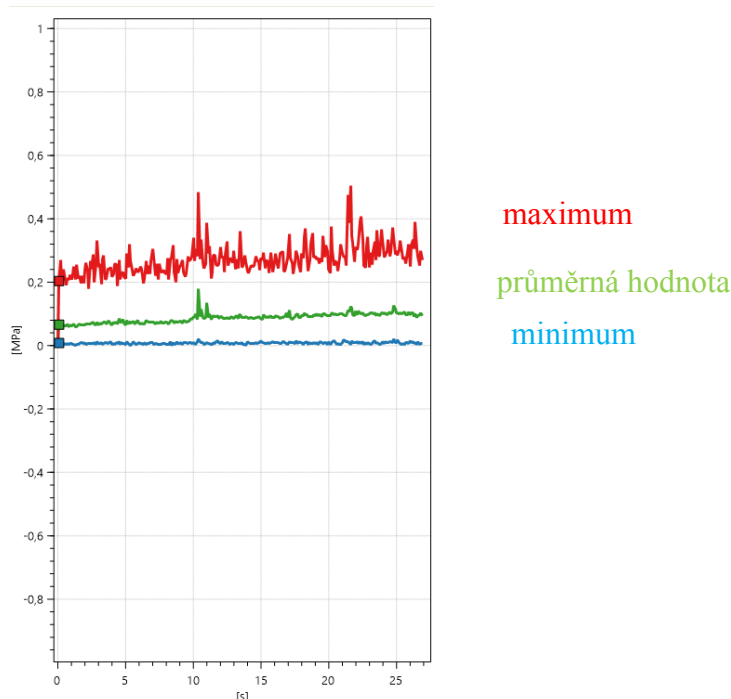


Obr. 50 – Trend posuvů rámečku světlometu

Dalším krokem bylo naměření napětí na vybraných plochách rámečku. To se provedlo za pomoci funkce vybrání měřicího pole. Pole byla vybrána na všech plochách, kde dokázaly kamery skeneru měřit. Výsledkem pak je vyjádření napětí ve formě barevné mapy (Obr. 51). Součástí výsledku je i graf (Obr. 52) znázorňující jak zprůměrovanou hodnotu napětí v rámečku v průběhu zatěžování, tak i naměřené minimum a maximum. Z grafu je jasné patrné, že zprůměrovaná hodnota se pohybuje do 0,2 MPa. Z čehož lze usoudit, že nedochází k deformaci rámečku světlometu. Maximální hodnota naměřeného napětí je 0,5 MPa naopak naměřené minimum je 0,02 MPa.



Obr. 51 – Průběh napětí měřeného na rámečku světlometu



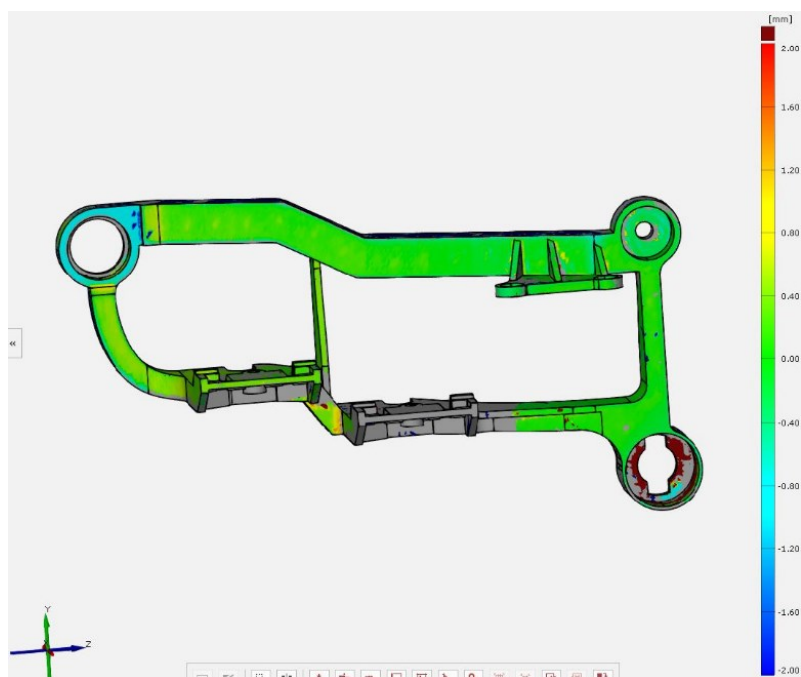
Obr. 52 – Graf zobrazující průběh napětí na rámečku světlometu

## 6.2 Vyhodnocení naměřených dat metodou 3D scan

Vyhodnocení naměřených dat metodou 3D scan probíhalo ve volně stažitelné základní verzi softwaru GOM Inspect 2017. Srovnání skenů bylo popsáno již v minulých kapitolách, proto je možné zaměřit se jen na provedení a vyhodnocení dat. Vyhodnocení dat probíhalo pro dva druhy porovnání. Jedním bylo porovnání sken sken a další pak sken CAD model.

První vyhodnocení se věnuje porovnání sken CAD model. Pro vlastní inspekci je v softwaru předpřipravený nástroj. Tento nástroj dokáže zobrazit mapu odchylek skenu na CAD modelu kolmou k měřené ploše. Pro větší názornost byly zvoleny kontrastní barvy modelů tak, aby šly výsledky lépe odečíst.

Barevná mapa, která se zobrazila na CAD modelu, nám bohužel nedokáže zobrazit posunutí jiné než kolmé k měřené ploše, jak je patrné z obrázku (*Obr. 53*). Posunutí, které je zobrazeno, je právě ve směru kolmém k měřené ploše. Nicméně z této barevné mapy lze zřetelně odečíst, že nedochází k deformaci rámečku. Zelená barva na mapě, která značí posunutí do čtyř desetin milimetru je toho důkazem.



Obr. 53 – Zobrazení barevné mapy odchylek

Jelikož barevná mapa nedokázala určit odchylky v žádných jiných směrech, bylo zapotřebí k tomuto účelu využít naskenovaných dat rámečku před zatížením. V místech, kde byly označeny body T1 až T10 při určování posunutí u předchozí metody DIC, byly vytvořeny dvojice bodů (Obr. 54). Jeden bod byl vždy na spodní hraně skenované součásti před zatížením a druhý po zatížení. Mezi těmito body se vytvořila přímka a ta se změřila. Výsledkem je tak tabulka (Obr. 55), ve které jsou zachyceny posunutí jednotlivých bodů. Tyto body jsem následně porovnal s posunutími u metody DIC.

Metoda DIC		Metoda 3D scan	
Bod	Posunutí [mm]	Bod	Posunutí [mm]
T1	0,97	T1	1,51
T2	1,04	T2	1,45
T3	1,13	T3	1,38
T4	1,22	T4	1,54
T5	1,33	T5	1,67
T6	1,40	T6	1,70
T7	1,52	T7	1,73
T8	1,60	T8	1,81
T9	1,69	T9	1,84
T10	1,78	T10	2,27

Obr. 54 – Tabulka porovnávající posunutí bodů metou DIC a 3D scan

Hodnoty mají stejně jako u metody DIC vzestupný charakter zleva doprava. Nejnižší naměřenou hodnotou je bod T3 s posunutím 1,38 mm, naopak největší posunutí vykazuje bod T10 a to 2,27 mm. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami oproti metodě DIC je v průměru 0,3 mm. Tento rozdíl dávám za vinu několika faktorům. Jedním z nich je ruční zadávání bodů. Zadávání nebylo zcela přesné, a proto je možné čekat u výsledných hodnot odchylku. Dalším faktorem, který může ovlivnit velikost odchylky, je sesazování skenů. Tento proces je automatický, a i přes snahu o co největší přesnost nebude nikdy zcela dokonalý.

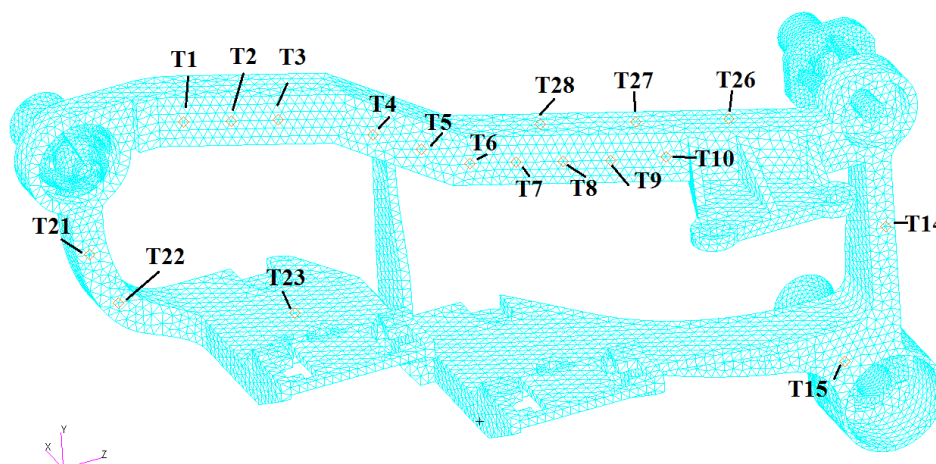


Obr. 55 – Umístění bodů pro měření posunutí

### 6.3 Vyhodnocení dat z FEM výpočtu

Konečné vyhodnocení FEM výpočtu proběhlo v softwaru Patran. Jak již bylo zmíněno všechny vstupní parametry souhlasily se vstupními parametry ze softwaru Ansys Workbench 18. Problémové kontakty byly řešeny následovně. Kontakty mezi rámečkem a kloubem byly řešeny jako lepené. Kontakty v kloubech byly řešeny jako třecí s třecím koeficientem  $f = 0,1$ .

Před generováním sítě, byly na geometrii vytvořeny body. Tyto body odpovídají vyhodnocovaným místům T1 až T28. Těmto bodům se následně přiřazují výpočetní uzly, ve kterých lze odečítat vypočtené parametry (Obr. 56).



Obr. 56 – Zaznačení bodů na rámečku světlometu v softwaru Patran

Hodnoty posunutí jsou opět zaneseny v tabulkách. Zároveň jsou porovnány s hodnotami naměřenými metodou DIC pro jednotlivé sekce. I při tomto měření se potvrdil trend vzestupujících hodnot zleva doprava. Nejvyšší naměřenou hodnotou je bod T26. Bod se v tomto případě posune o 2,33 mm. Naopak minimem naměřeným z FEM výpočtu je bod T1. Hodnota minima je 0,93 mm.

První sekce pro porovnání je pro body T1 až T10 (Obr. 57). Zde se hodnoty pohybují od 0,93 mm po 2,01 mm. Potvrzuje se zde vzestupná tendence zleva doprava. Velikost posunutí se zvětšuje.

Metoda DIC		FEM výpočet	
Bod	Posunutí [mm]	Bod	Posunutí [mm]
T1	0,97	T1	0,97
T2	1,04	T2	1,04
T3	1,13	T3	1,13
T4	1,22	T4	1,22
T5	1,33	T5	1,33
T6	1,40	T6	1,40
T7	1,52	T7	1,52
T8	1,60	T8	1,60
T9	1,69	T9	1,69
T10	1,78	T10	1,78

Obr. 57 – Porovnávací tabulka naměřených hodnot první sekce

Z tabulky posunutí bodů je patrné, že se hodnoty sobě navzájem blíží. K větším odchylkám dochází až u posledních bodů T9 a T10, kdy se odchylka bodů pohybuje až k 0,3 mm.

Další sekci jsou body T14 a T15. Tyto body se nacházejí nejvíce napravo, a proto je zde očekáváno největší posunutí vzhledem k dosavadním poznatkům. Tato domněnka byla zcela naplněna a hodnoty jsou opravdu nejvyšší. Z obrázku tabulky (*Obr. 58*) je patrné, že se k sobě opět hodnoty blíží. Odchylka metod v tomto případě nepřesáhla jednu desetinu milimetru.

Metoda DIC		FEM výpočet	
Bod	Posunutí [mm]	Bod	Posunutí [mm]
T14	2,14	T14	2,14
T15	2,13	T15	2,13

Obr. 58 – Porovnání posunutí u druhé sekce

Třetí měřenou sekci jsou naopak tři body umístěny na rámečku nalevo ve spodní části. Jsou to body T21 až T23. Tato sekce jako jediná nevykazuje zvyšování posunutí ve směru zleva doprava. Jak je patrné z obrázku tabulky (*Obr. 59*), u bodů T21 a T22 sice dochází k nárůstu o skoro 0,4 mm, naopak mezi body T22 a T23 dochází k mírnému poklesu až stagnaci posunutí. Při porovnání s metodou DIC je také patrné, že v tomto případě se hodnoty u naměřených bodů výrazně liší pouze u bodu T22, zde je odchylka přes 0,5 mm. V dalších dvou případech se hodnota odchylky pohybuje do 0,2 mm.

Metoda DIC		FEM výpočet	
Bod	Posunutí [mm]	Bod	Posunutí [mm]
T21	0,80	T21	0,80
T22	0,85	T22	0,85
T23	1,20	T23	1,20

Obr. 59 – Porovnání posunutí u třetí sekce

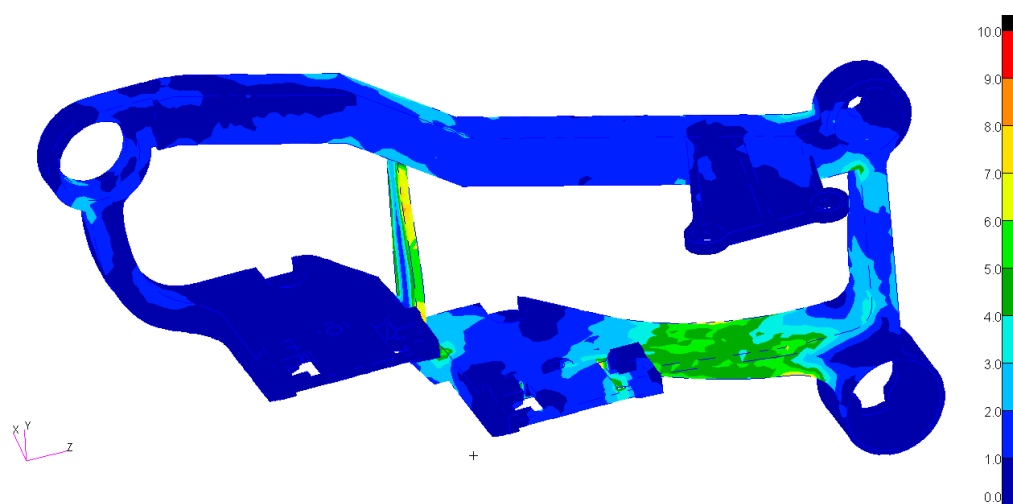
Poslední měřenou sekci byly body T26 až T28. Na této sekci se opět potvrdil trend zvyšování hodnoty posunutí zleva doprava. Naměřené hodnoty jsou od 1,71 mm do 2,33 mm. U této měřené sekce došlo k částečné shodě naměřených datech. Odchylka mezi metodami byla od 0,1 mm do 0,4 mm. V této sekci se také nachází bod s nejvyšším posunutím je jím bod T26 s naměřenou hodnotou 2,33 mm (*Obr. 60*).

Metoda DIC		FEM výpočet	
Bod	Posunutí [mm]	Bod	Posunutí [mm]
T26	1,91	T26	1,91
T27	1,72	T27	1,72
T28	1,56	T28	1,56

Obr. 60 – Porovnání posunutí u čtvrté sekce

Pro zobrazení průběhu napětí byla v prostředí softwaru vytvořena barevná mapa (*Obr. 61*). Na této mapě lze odečíst míru napětí na jednotlivých částech rámečku. Z obrázku je patrné, že se napětí pohybuje do 10MPa. Nejvíce exponovanou částí rámečku je střední spojovací část a část napravo od středního světlometu. Nicméně napětí je na tak nízké úrovni, že vzhledem k pevnosti materiálu rámeček neovlivní.

Důvodů pro velký rozdíl v hodnotách napětí na rámečku při měření metodou DIC a FEM výpočtem je několik. Jedním z důvodů je, že jsem skenerem nedokázal zachytit nejvíce exponované části rámečku. Při skenování jsem se soustředil na co nejkomplexnější mapu, a ne pouze na vybrané části. Nejvíce exponované části vyplynuly až z pozdějšího FEM výpočtu. Dalším důvodem je nastavení kontaktů a vůlí v kloubech rámečku. U reálného rámečku měřeného metodou DIC se při zatížení vůle projeví a celý rámeček se vlivem působící síly pouze posunul, ale nedeformoval se. Naopak u FEM výpočtu vůle v kloubech nastavit nelze, z toho vyplývá, že celý systém je tužší a dochází k mírné deformaci rámečku.



Obr. 61 – Napětí na rámečku po zatížení



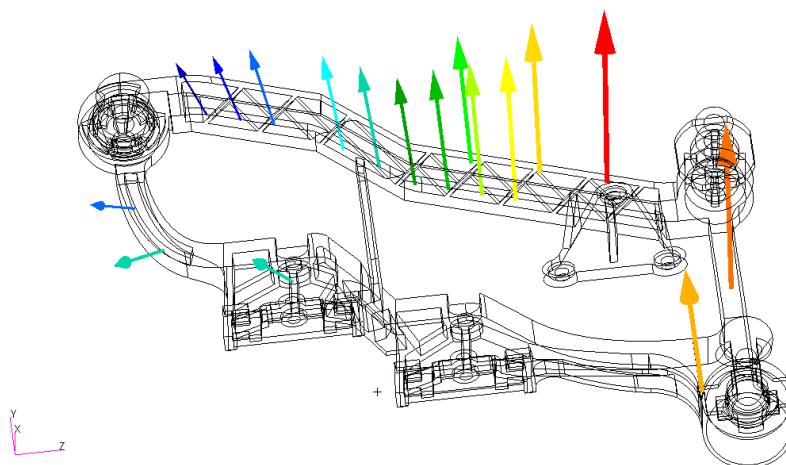
## 7 Zhodnocení dosažených výsledků

Celkově se data naměřila pomocí tří různých technologií. První a pro práci nejdůležitější byla metoda DIC. Myslím si, že tato praktická metoda se pro tuto aplikaci hodila ze všech tří nejlépe. Pomocí této metody se mi podařily změřit posunutí vybraných bodů rozmístěných po různých částech rámečku světlometu a napětí působící na rámeček. Dále se pomocí této metody podařilo vykreslit trendy posuvů bodů. Celkově z měření vyplývá, že rámeček samotný se při přejezdu příčného prahu rychlostí přibližně 40 km/h nedeformuje a pouze dochází k posunutí celého rámečku. Je to z důvodů vůlí v plastových kloubech, které byly vytisknuty na 3D tiskárně. Také díky jejich volnosti v určitých směrech, především u kloubu s posuvnou vazbou. V neposlední řadě také díky pružné deformaci plastových dílců, které jsou výrazně měkčí než samotný kovový rámeček.

Další praktickou metodou, kterou se měřily posuvy, respektive deformace rámečku, byla metoda 3D scan. Pomocí této metody se mi podařily změřit jak posuvy bodů, tak potvrdit fakt, že se rámeček při zatížení 24,4 N samotný nedeformuje. Také se mi povedlo ověřit trend posuvů bodů. Potvrzením o nedeformování rámečku je barevná mapa, která vznikla v softwaru GOM Inspect 2017. Na vzniklé porovnávací mapě lze vidět, že nedošlo k žádné deformaci, nebo jen velice zanedbatelné. Naměřené posuvy bodů jsou do jisté míry ovlivněny automatickým sesazením skenů a ručním zadáváním, nicméně nikterak nevybočují při porovnání s daty naměřenými metodou DIC. Důležitým zjištěním bylo také, že se při zatížení potvrdil nárůst posunutí bodů z levé strany rámečku na pravou.

Třetím způsobem měření deformací byl FEM výpočet. Pomocí tohoto výpočtu jsem dokázal zjistit posunutí vybraných bodů a průběh napětí. Při porovnání posunutí s metodou DIC se ve velké části téměř shodovaly. Některé hodnoty bodů se při porovnání neshodovaly, jednalo se především o jednotlivé body v měřených sekcích, a ne o sekce jako celky. To dokazuje, že se výpočetní model povedlo přiblížit reálnému zatěžování. Odchyłky posunutí mezi metodami mohly vzniknout například při nastavování kontaktů, nebo nemožnosti nastavení vůlí ve výpočetním modelu. Pomocí FEM výpočtu jsem také dokázal potvrdit trend posuvu bodů (*Obr. 62*), který se shodoval s trendem naměřeným metodou DIC. Dále jsem dokázal potvrdit, že nedochází k významné deformaci rámečku, jelikož výsledné napětí nepřesahovalo 10 MPa. Při porovnání naměřených napětí s metodou DIC lze vidět, že hodnoty nejsou shodné. Tento

fakt je dán tím, že kontakty ve FEM výpočtu jsou nastavené bez vůlí a nastavený třecí koeficient se nemusí plně shodovat s realitou.



Obr. 62 – Trend posunutí bodů v prostředí softwaru Patran

Z měření bylo tedy zjištěno, že při přejezdu příčného prahu rychlostí 40 km/h nedochází k deformaci samotného rámečku, ale pouze k celkovému posunutí rámečku. Tento jev by mohl například způsobit při přejezdu příčného prahu nechtěné osvětlení řidiče v protijedoucím vozidle.

Z celého měření vyplývá, že je konstrukce rámečku značně předimenzovaná a klouby, které drží rámeček na požadovaném místě jsou příliš měkké nebo mají velkou vůli. Myslím si, že při opakovaném zatížení hrozí jejich poškození. Proto bych navrhoval změnu geometrie rámečku z důvodu snížení hmotnosti a pevnosti nebo změnu materiálu rámečku při zachování technologie 3D tisku. Jako možnost bych navrhoval výtisk z plastového filamentu s obsahem kovových částic. Vyřešil by se tak i potřebný odvod tepla a zároveň se snížila celková hmotnost.

## 8 Závěr

Jedním z cílů mé práce bylo vyhodnotit validnost naměřených dat měřených pomocí metody DIC. Validitu naměřených dat jsem ověřil pomocí měření dvěma dalšími metodami, a to metodou 3D scan a FEM výpočtem. Naměřená data z těchto dvou metod se shodovala téměř ve všech pozorovaných aspektech s měřením metodou DIC. Největší rozdíly byly pozorovány při porovnání napětí FEM výpočtu a metody DIC. Důvody odchylek, které vznikly při měření, jsou popsány v kapitolách výše. Naměřená data lze po popsání těchto důvodů odchylek hodnotit jako validní.

Dalším z cílů bylo zhodnotit a navrhnout optimální postup pro měření metodou DIC. V práci jsem popsal a vyřešil všechny problémy, které při práci s optickým korelátorem nastaly. Dále jsem popsal měření od přípravy vzorku přes nastavení osvětlení a kamer až po samotné skenování a editaci dat.

Třetím cílem mé práce bylo porovnat výsledky metody DIC s předpokladem z FEM analýzy. Podařilo se mi vytvořit výpočetní model rámečku s kloubovými vazbami a úspěšně dokončit FEM analýzu. Následně jsem data porovnal a vyhodnotil.

V diplomové práci se mi podařilo dosáhnout všech stanovených cílů.

Obecně si myslím, že metoda DIC má a bude mít velké uplatnění jak ve velkých průmyslových podnicích například pro optimalizaci dílů, tak také v menších laboratořích a výzkumných centrech pro vývoj a výzkum. Výhodou tohoto zařízení je rychlá příprava vzorků, kalibrace a možnost dostání okamžitých výsledků. Jako nevýhodu je možné zmínit cenu přístroje a nutnost nanášení paternu na skenovanou součást.

# Zdroje

- [1] – [HP 3D HD CAMERA PRO](#). In: *Physimetrics* [online]. 2018 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.physimetrics.com/hp-3d-hd-camera-pro/>
- [2] – SOUKUP, Karel. *Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/8623/1/Bc.%20Karel%20SOUKUP%20-%20Mereni%20mechanickych%20vlastnosti%20konstrukcnich%20materialu%20s%20vyuzitim%20optickych%20metod%20mereni%20deformace.pdf>. Diplomová. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.
- [3] – A Users Guide to Video Extensometers. In: *Ametek test* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.ametektest.com/learningzone/library/articles/a-users-guide-to-video-extensometers>
- [4] – CamRecord – High Performance in All Environments. In: *Nacinc* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.nacinc.com/products/camrecord-high-speed-digital-cameras/>
- [5] – Extensometers. In: *3r-labo* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.3r-labo.com/en/extensometers>
- [6] – Understanding Extensometry During Tensile Testing. In: *Azom* [online]. 2012 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6052>
- [7] – Q-450 - High Speed DIC - Vibration Analysis and Transient Events. In: *Dantecdynamics* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/digital-image-correlation>
- [8] - Principle of Digital Image Correlation. In: *Correlatedsolutions* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://correlatedsolutions.com/digital-image-correlation/>
- [9] – ŠTÁBL, Jakub. *Mechanické vlastnosti vybraných dřev v tlaku měřené standardními zkouškami a optickou metodou na bázi metody korelace digitálního obrazu* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: [http://is.mendelu.cz/zp/portal\\_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=42609;download\\_prace=1..](http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=42609;download_prace=1..) Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Václav Seber.

- [10] – Normalized 2-D cross-correlation. In: *Mathworks* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/normxcorr2.html?w.mathworks.com>
- [11] – KOV (SLS). *Trider* [online]. , <https://trider.cz/material/kov> [cit. 2018-04-15].
- [12] – SMITH, Josh. Sigma Labs' In-Process Technology to Overcome Barriers in Metal 3D Printing. In: *3d print* [online]. 2015, 2015 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://3dprint.com/67882/sigma-labs-eta-3d-print/>
- [13] - NIT Named Exclusive Distributor for Optronis CamRecord in Americas. In: *Nac image technology* [online]. 2016 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.nacinc.com/news/nit-named-exclusive-distributor-for-camrecord-high-speed-digital-cameras-in-the-americas.php>
- [14] – EISLEY, Joe a Anthony M. WAAS. Analysis of structures: an introduction including numerical methods. Chichester: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-97762-0.
- [15] – ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 125 s. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [16] – POCHMON, Michal. Optické měřicí 3D metody. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 13 s. ISBN 978-80-244-3072-0.
- [17] – PAVLÍČEK, Pavel. Vybrané optické problémy týkající se 3D senzorů. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 37 s. ISBN 978-80-244-3108-6.
- [18] – LIČEV, Lačezar. Analýza, modelování, rozpoznávání a vizualizace procesu měření objektů na snímcích. Brno: Computer Press, 2010. ISBN 978-80-251-3296-8.
- [19] – PAVELKA, Karel. Fotogrammetrie 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [20] – ŠONKA, Milan, Václav HLAVÁČ a Roger BOYLE. Image processing, analysis, and machine vision. Fourth edition. Austrálie: Cengage Learning, 2015. ISBN 978-1-133-59369-0.
- [21] – Váhový senzor 5kg. In: *Gme* [online]. 2018 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/vahovy-senzor-5kg#product-detail>